

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra Elektroenergetiky

Zatěžovací charakteristiky malých zdrojů nízkého napětí
Load Characteristics of Small Low Voltage Power Sources

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Miroslav Orel**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Zatěžovací charakteristiky malých zdrojů nízkého napětí**
Load Characteristics of Small Low Voltage Power Sources

Zásady pro vypracování:

Analýza zdrojů a spotřeb v rozvodně 110/22 kV

Statické zatěžovací charakteristiky

Dynamické zatěžování (připojení odporové a induktivní zátěže, spínaných zdrojů)

Analysis of power sources and loads in 110/22kV substation

Static load characteristics

Dynamic loading

Seznam doporučené odborné literatury:

Electrical substations and lines / Lucie Noháčová, Jiřina Mertlová. - 1. vyd.. - Praha : BEN - technická literatura, 2010 - 166 s. : il., mapa ISBN 978-80-7300-265-7 (váz.)

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tadeusz Sikora, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Kelči 5. 5. 2014



.....
Bc. Miroslav Orel

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je analýza a měření malých zdrojů nízkého napětí, používaných zejména v rozvodu zajištěného střídavého nízkého napětí vlastní spotřeby elektrických stanic 110/22 kV. Nejprve popisují typický rozvod vlastní spotřeby těchto elektrických stanic. V další části je proveden částečný teoretický rozbor a popis zdrojů, které se zde vyskytují.

V praktické části následuje výběr a návrh jednotlivých testovacích zátěží. Výsledky provedených měření jsou zobrazeny v charakteristikách.

Klíčová slova

Elektrická stanice; rozvod vlastní spotřeby; zdroje nízkého napětí; střídač; usměrňovač; statické a pseudo-statické zatěžovací charakteristiky; nelineární zátěž.

Abstract

The aim of this thesis is the analysis and measurement of small low-voltage power sources, used especially in the distribution of uninterruptible AC low voltage own consumption of electrical power stations 110/22 kV.

I first describe the typical distribution of own consumption of these electric stations. In the next part is executed theoretical analysis and description of power sources that occur here.

In the practical part is executed a selection and design of the individual test loads. The measurement results are shown in the characteristics.

Keywords

Power stations; distribution of own consumption; low voltage source; inverter; rectifier; static and pseudo-static load characteristics; non-linear load.

Seznam zkratk a symbolů

AC	Anglická zkratka pro střídavý proud (Alternating Current)
COP	Anglická zkratka pro trvalý výkon (Continuous Power)
ČEZ	Česká energetická společnost ČEZ, a. s.
ČSN	Česká státní norma
DC	Anglická zkratka pro stejnosměrný proud (Direct Current)
EN	Evropská norma
GTO	Anglická zkratka pro hradlem vypínaný tyristor (Gate Turn Off)
HVDC	Anglická zkratka pro přenosovou stejnosměrnou síť (High Voltage Direct Current)
IGBT	Anglická zkratka pro bipolární tranzistor s izolovaným hradlem (Insulated Gate Bipolar Transistor)
IGCT	Anglická zkratka pro tyristory obsahující integrovaný řídící obvod (Integrated Gate Commutated Thyristor)
IT	Izolovaná síť, popřípadě uzemněná přes velkou impedanci
PC	Osobní počítač
TT	Síť, která má jeden bod přímo uzemněn
UPS	Anglická zkratka pro zdroj nepřerušitelného napájení (Uninterruptible Power Supply)
VA	Voltampérová
NN	Nízké napětí
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí

C	kapacita	[F]
C_{10}	jmenovitá kapacita baterie při 10hodinovém vybíjení	[Ah]
D	deformační výkon	[VA]
I	proud	[A]
I_1	proud první harmonické	[A]
I_h	harmonický proud	[A]
I_z	proud zátěží	[A]
P	činný výkon	[W]
Q	jalový výkon	[var]
R	elektrický odpor	[Ω]
S	zdánlivý výkon	[VA]
$THDi$	harmonické zkreslení proudu	[%]
$THDu$	harmonické zkreslení napětí	[%]
$THFi$	činitel harmonického zkreslení proudu	[%]
$THFu$	činitel harmonického zkreslení napětí	[%]
U	napětí	[V]
U_1	napětí první harmonické	[V]
U_b	vnitřní indukované napětí ve statoru synchronního stroje vyvolané budícím proudem	[V]
U_h	harmonické napětí	[V]
U_z	napětí na zátěži	[V]
X_C	kapacitní reaktance	[Ω]
X_d	synchronní reaktance	[Ω]
X_L	induktivní reaktance	[Ω]
Z	impedance	[Ω]
$\cos\varphi$	účinnost	[-]
f	frekvence	[Hz]
h	řád harmonické	[-]
i	okamžitý proud	[A]
i_h	poměrný harmonický proud	[-]

p	okamžitý výkon	[W]
t	čas	[s]
u	okamžité napětí	[V]
u_h	poměrné harmonické napětí	[-]
λ	účiník (Power Factor)	[-]

Obsah

Úvod	9
1 Analýza zdrojů a spotřeb v rozvodně 110/22 kV	10
1.1 Vlastní spotřeba elektrických stanic 110/22 kV	10
1.1.1 Rozvod střídavého napětí vlastní spotřeby	10
1.1.2 Rozvod stejnosměrného a zajištěného střídavého napětí	11
1.1.3 Rozvod stlačeného vzduchu	13
2 Zdroje zajištěného rozvodu nízkého napětí el.stanic	15
2.1 Akumulátory	15
2.2 Polovodičové zdroje obecně - měniče	16
2.3 Usměrňovače	16
2.4 Střídače	18
2.4.1 Jednofázový napěťový střídač	19
2.5 Zdroje nepřerušitelného napájení UPS	20
2.6 Motorgenerátory	24
3 Měření malých zdrojů nízkého napětí	27
3.1 Statické a pseudo-statické zatěžovací charakteristiky zdrojů	27
3.2 Matematické vyjádření měřených veličin	27
3.3 Měřicí systém a testované zdroje	31
3.3.1 Měřicí přístroj	31
3.3.2 Testované zdroje	32
3.4 Měření charakteristik zdrojů s činným zatížením	34
3.4.1 Návrh činné zátěže	34
3.4.2 Charakteristiky zdrojů s činnou zátěží	36
3.5 Měření charakteristik zdrojů s jalovým zatížením	38
3.5.1 Návrh induktivní a kapacitní jalové zátěže	38
3.5.2 Charakteristiky zdrojů s induktivní a kapacitní zátěží	40
3.6 Měření charakteristik zdrojů s nelineárním zatížením	43
3.6.1 Návrh nelineární zátěže	44
3.6.2 Charakteristiky zdrojů s nelineárním zatížením	45
3.7 Transientní záznamy přechodných jevů	49
3.8 Zatížení zdroje Elteco PS30T7 instalovanými spotřebiči elektrické stanice	54
Závěr	55
Seznam použité literatury	57
Seznam příloh	58

Úvod

Správná a bezporuchová funkce zařízení elektrických stanic 110/22 kV se významně podílí na spolehlivosti a kvalitě dodávky elektrické energie, jejíž spotřeba se každým rokem zvyšuje. To si vynucuje soustavné zdokonalování techniky rozvodu elektrické energie.

Tato diplomová práce se zabývá testováním zdrojů nízkého napětí, nacházejících se v zajištěném rozvodu střídavého napětí elektrických stanic 110/22 kV.

V teoretické části je popsána vlastní spotřeba takovéto elektrické stanice se základní orientací v polovodičových zdrojích a motorgenerátorech. V praktické části pak obsahuje měření zatěžovacích charakteristik vybraných zdrojů s různým druhem zatížení. Pro tyto účely měření jsou navrženy jednotlivé druhy zátěží s posouzením jejich vlivu na testované zdroje.

1 Analýza zdrojů a spotřeb v rozvodně 110/22 kV

Mezi zdroje a spotřeby v elektrických stanicích řadíme všechna zařízení, která jsou součástí elektrických obvodů, označovaných jako vlastní spotřeba elektrické stanice. Tato práce se zabývá testováním zdrojů, které jsou součástí zajištěného rozvodu střídavého napětí vlastní spotřeby. V následujícím textu je proto proveden rozbor a popis těchto obvodů.

1.1 Vlastní spotřeba elektrických stanic 110/22 kV

Zařízení vlastní spotřeby jsou součástí každé elektrické stanice. Hlavními zdroji pro rozvod vlastní spotřeby jsou vždy transformátory, obvykle v provedení 22/0,4 kV. Energie ze zdrojů vlastní spotřeby musí být zajištěna při všech možných zapojeních elektrické stanice a také při různých provozních stavech, které jsou děleny na:

- normální provoz elektrické stanice;
- částečné odstavení el. stanice (opravy, revize údržba);
- poruchové odstavení části el. stanice;
- totálním výpadku z důvodu poruchy nebo havárie.

Proto všechna hlavní zařízení stanice musí být připojena na záložní napájení, respektive na napájení zálohované, označované také jako zajištěné napájení. Zdroje zajištěného rozvodu elektrické energie jsou:

- akumulátory (staniční baterie);
- usměrňovače (nabíjejí akumulátory);
- střídače (napájené z akumulátorů);
- zdroje nepřerušitelného napájení (UPS);
- motorgenerátory;
- DC/DC měniče.

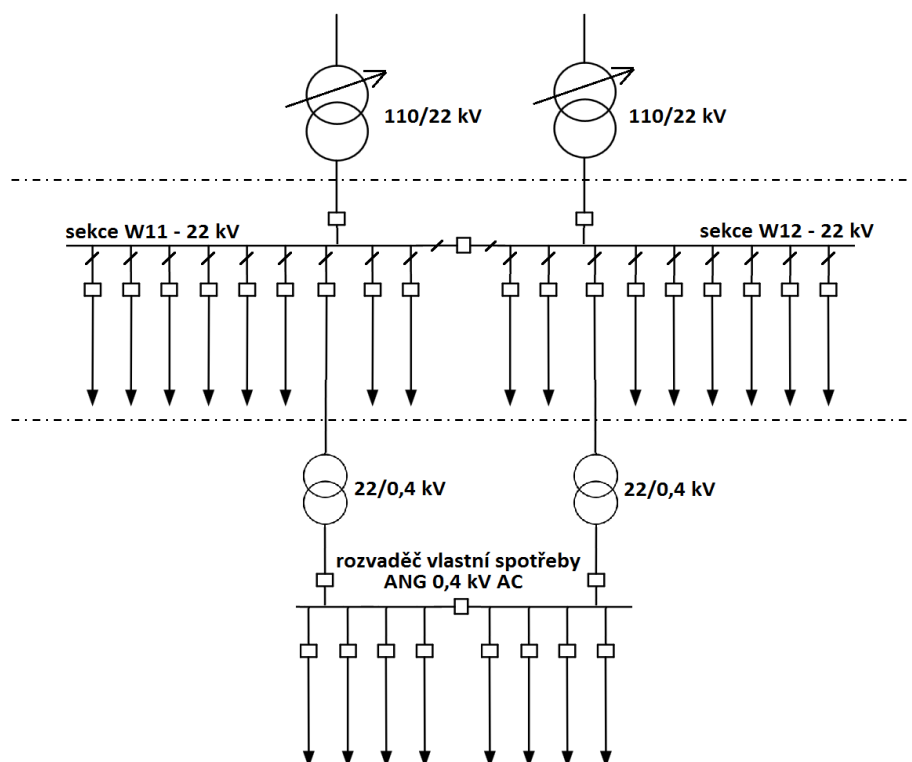
Mezi spotřeby elektrické stanice pak řadíme všechna zařízení, která nám umožňují provoz důležitých zařízení, zastávající hlavní funkce elektrických stanic. Jsou to zařízení:

- pohony pro spínací prvky;
- pohony ventilátorů pro chlazení transformátorů;
- poruchové ventilátory pro vyvětrání prostorů v případě poruchy provázené dýmem a sazemí (někdy také označované jako požární ventilátory);
- pohony pro klimatizace určených prostorů a odvětrání akumulátoroven;
- pohon kompresorů pro výrobu stlačeného vzduchu;
- obvody ovládací a řídící, jistící, telekomunikační a všechny zásuvkové obvody;
- osvětlení provozní, osvětlení cest a podél vnějšího oplocení;
- osvětlení nouzové (po dobu ztráty napětí na provozním osvětlení).

Obecně lze vlastní spotřebu elektrické stanice rozdělit na rozvod střídavého a stejnosměrného napětí.

1.1.1 Rozvod střídavého napětí vlastní spotřeby

Transformátor vlastní spotřeby, připojený na hlavní přípojnice rozvodného zařízení, je hlavním zdrojem energie pro vlastní spotřebu. Obvykle je v provedení 22/0,4 kV a prakticky vždy se počítá s dalším obdobným transformátorem, jako zdrojem záložního napájení, který je připojen na jiný úsek přípojníc 22 kV (*obr. 1*) nebo na distribuční síť. Tyto transformátory se instalují v provedení suchém, kdy můžou být součástí rozváděčů vlastní spotřeby nebo v provedení s olejem, kdy jsou umístěny v transformátorových komorách (místnostech), kde musí být provedena opatření pro případný únik transformátorového oleje. Rozváděče vlastní spotřeby jsou obvykle řešeny s jednou podélně dělenou přípojnici pro zvýšení spolehlivosti. Typické provedení je takové, že odvody na zařízení jsou zdvojeny (na každou přípojnici jeden). Tento střídavý rozvod se provozuje tak, že spínač přípojníc je rozepnut a při výpadku provozovaného transformátoru, dojde k převedení na druhou přípojnici s beznapětovou pauzou tzv. automatikou zásoku. [1,2]



Obr. 1: Jednopolové schéma možného zapojení střídavého napětí vlastní spotřeby v el. stanici

1.1.2 Rozvod stejnosměrného a zajištěného střídavého napětí

Součástí vlastní spotřeby je také stejnosměrný rozvod napětí, který většinou využívá dvou napěťových úrovní a to:

- 110 V DC nebo 220 V DC, v zapojení IT (všechny živé části vodičů jsou proti zemi izolovány nebo jsou spojeny se zemí přes velkou impedanci), pro ovládací a signalizační obvody, napájení ochran, napájení nouzového a náhradního osvětlení, nouzových elektrických pohonů, telekomunikačních obvodů a poruchových (požárních) ventilátorů;
- 24 V DC nebo 60 V DC, v zapojení TT (jeden bod pracovní soustavy nebo jeho pól bezprostředně spojen se zemí), využívaných většinou pouze pro signalizaci.

Stejnoseměrný rozvod je zajišťován ze stejnosměrných rozvaděčů a je provozován obdobně jako rozvod střídavého napětí, se dvěma přípojnici, dvěma zdroji, se zdvojenými přívody a rozepnutým spínačem přípojníc (spínačem sekcí). Zdrojem pro 110 V DC jsou dvě sady staničních akumulátorů, většinou olověných, pro každou přípojnici (sekcí) jedna sada (obr. 2). Umísťují se do samostatné místnosti, zvané akumulátorovna. Zejména při havarijních stavech elektrických stanic je velmi důležité, aby tyto baterie spolehlivě plnily svou funkci.



Obr. 2: Akumulátory v elektrické stanici – zdroj 220 V ss

K těmto bateriím jsou trvale paralelně připojeny usměrňovače, do každé přípojnice minimálně jeden, které je trvale dobíjí. Musí být dimenzovány tak, aby pokrývaly stálý stejnosměrný odběr. Obvykle je do obvodu zařazena jednotka pro hlídání přerušení proudu v obvodu staničních akumulátorů. Porucha v tomto obvodu (např. z důvodu přerušení článků, vedení, pojistek), není pak zjištěna až při výpadku sítě, nýbrž je ihned zaznamenána a hlášena. Tím je možné se vyvarovat závažnějších poruch zařízení.

V praxi se osvědčil provoz, kdy na rozdíl od střídavého rozvodu jsou obě přípojnice pod napětím a jednotlivé odvody na zařízení jsou odděleny polovodičovými diodami. Při výpadku některého ze zdrojů je tedy každé zařízení plně zálohováno. Pro napěťovou hladinu 24 V DC se dnes většinou instalují DC/DC polovodičové měniče, které jsou napájeny z přípojnice 110 V DC. Na některých elektrických stanicích se pro toto napětí využívá dalších dvou sad olověných baterií s usměrňovači. Rozvod je obdobný jako v případě 110 V DC, ale tato síť je provozována v zapojení TT, kdy je jeden pól spojen s uzemněním v elektrické stanici. Součástí stejnosměrných rozváděčů jsou také relé pro hlášení poruchových stavů. Signalizují ztrátu napětí, přepětí a u sítě 110 V DC, která je v zapojení IT, se signalizuje také zemní spojení.

Pro zařízení, která musejí být zálohována a nemohou být napájena stejnosměrným proudem, jsou v elektrických stanicích instalovány střídače s výstupním napětím 230 V AC (*obr. 17*), napájené ze stejnosměrného rozvodu. Většinou jsou to komplexní jednotky s automatikou řízení a tzv. obtokovou jednotkou (bypass), která musí umožnit bez přerušení napájení přemostit střídač napětím ze sítě a zpět. Využívají se k napájení některých částí řídicích systémů, telekomunikačních obvodů, nouzového osvětlení, elektronického zabezpečovacího systému objektu nebo napájení požárních (poruchových) ventilátorů.

Často bývá řešení stejnosměrného a zálohovaného rozvodu na elektrické stanici realizováno dodávkou od jednoho výrobce (*obr. 3*).



Obr. 3: Rozváděče stejnosměrné vlastní spotřeby s usměrňovači a DC/DC měniči od výrobce Benning

1.1.3 Rozvod stlačeného vzduchu

I když rozvod stlačeného vzduchu s kompresorovou stanicí nepatří mezi elektrické rozvody vlastní spotřeby v elektrické stanici, je její nedílnou součástí, jak z hlediska spotřeby, tak z hlediska zdroje akumulované energie. Kompresorové stanice s rozvodem stlačeného vzduchu jsou součástí všech elektrických stanic, které jsou vybaveny spínacími prvky s tlakovzdušnými pohony. V každé elektrické stanici jsou alespoň dva kompresory, které jsou v samostatné místnosti – kompresorovně. V provozu je pouze jeden kompresor, a pokud dojde k jeho poruše, musí se provoz ručně převést na další. Pokud to řídicí prvky umožňují, lze tento úkon provést dálkově z dispečerského stanoviště. Kompresorovna většinou obsahuje samostatný rozváděč, který je připojen na rozváděč vlastní spotřeby střídavého napětí. Vícestupňová kompresorová soustrojí (*obr. 4*) jsou často poháněny velkými asynchronními elektromotory (běžně 30 kW a více) a rozvod střídavého napětí musí být na toto zatížení patřičně dimenzován. Kompresory se spouštějí samočinně za pomoci spínacích manometrů při dosažení spodní úrovně primárního tlaku a stejně i samočinně vypínají při dosažení horní úrovně primárního tlaku. Tlakovzdušný rozvod obsahuje více úrovní o různém tlaku, podle druhu instalovaných zařízení. Většinou se volí jako primární rozvod 2,0 MPa, sekundární 1,2 MPa nebo 0,5 MPa (někdy obě úrovně). Při ztrátě elektrické energie, poskytuje tlakovzdušný rozvod zásobu energie pro spínací prvky v tzv. vzdušnicích. Záleží pak na jejich velikosti, instalovaném počtu a provozním tlaku, od které se zásoba energie odvíjí.



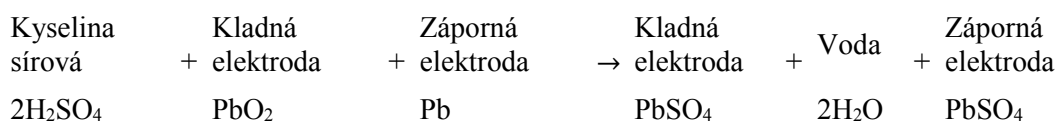
Obr. 4: Kompresorovna s vícestupňovým kompresorem

2 Zdroje zajištěného rozvodu nízkého napětí el.stanic

Jelikož se tato práce zabývá testováním střídavých zdrojů nízkého napětí používaných ve střídavém zajištěném rozvodu elektrické stanice 110/22 kV, je třeba znát a rozumět jejich základní funkci, vlastnostem a konstrukci. Jsou to střídače, zdroje nepřerušitelného napájení (UPS) a motorgenerátory. Pro úplnost jsou ale také uvedeny i zdroje stejnosměrného rozvodu, které s provozem uvedených střídavých zdrojů souvisí. Jsou to akumulátory, které napájí střídače nebo také usměrňovače, které je dobíjí.

2.1 Akumulátory

Akumulátory jsou v současné době na elektrických stanicích nejdůležitějším zdrojem pro nouzové napájení. Slouží jako elektrochemické zdroje pro stejnosměrný rozvod napětí. Při použití polovodičových střídavých zdrojů (střídač a UPS jednotky), které jsou dnes ve většině stanic, jsou sekundárním zdrojem i pro rozvod zajištěného střídavého napětí. Akumulátory s olověnými články jsou pro energetické účely nejpoužívanější. Celková reakce vybíjení probíhá následující reakcí:



Staniční akumulátory většinou nejsou určeny pro cyklický provoz a jejich životnost se pak udává v rocích provozu. Jsou na ně kladeny vysoké nároky, týkající se dlouhé životnosti a provozní spolehlivosti. Jak bylo uvedeno výše, tyto baterie se trvale dobíjí usměrňovači na konstantní udržovací napětí 2,23 až 2,3 V na článek, v závislosti na jejich konstrukci. Životnost akumulátorů se uvádí 4 až 20 let, opět dle druhu konstrukce. Akumulátory můžeme rozdělit dle provedení kladných elektrod na akumulátory:

- s trubkovými elektrodami;
- s tyčovými elektrodami;
- s velkopovrchovými elektrodami;
- s mřížkovými elektrodami.

Nejpoužívanější typ staničních akumulátorů je typ s trubkovými elektrodami. Tento typ se vyrábí v kapacitách C_{10} od 15 Ah až do 12000 Ah. Pokud se trvale dobíjí na jmenovité napětí článku 2,23 V a k vybíjení dochází jen výjimečně, například při ztrátách síťového napětí, uvádí se životnost 15 až 18 let. Pokud se využívají v cyklickém provozu, mají životnost přes 1000 cyklů. Tento typ není vhodný pro větší vybíjení než jednohodinové. [3]

Další typ akumulátorů, který se také používají jako staniční, je typ s tyčovými kladnými elektrodami Vb. Vyrábějí se v kapacitách C_{10} 250 až 2500 Ah. Lze je vybíjet až 10minutovými proudy, jelikož mají malý vnitřní odpor. Jsou provedeny ve 12 V a 6 V monoblocích.

Dnes se prosazují také ventilem řízené akumulátory. Například akumulátory typu OPzV s gelovým elektrolytem, které jsou vhodné zejména pro bezúdržbové provozy. Tyto baterie se dále dělí také dle typu elektrod

Akumulátory jsou většinou provozovány v paralelním pohotovostním provozu, viz kapitola 1.1.2, kdy je výkon spotřebičů trvale hrazen usměrňovači, a akumulátory jsou nabíjeny na konstantní napětí.

Potřebnou kapacitu akumulátoru spočítáme dle vztahu:

$$C_{10} = \frac{I \cdot t \cdot 100}{\eta} \quad [\text{Ah; A; h, -}] \quad (1)$$

C_{10} – jmenovitá kapacita akumulátoru při 10hodinovém vybíjení

I – vybíjecí proud

t – doba nabíjení

η – využití kapacity akumulátoru s vybíjecím proudem po stanovenou dobu nabíjení

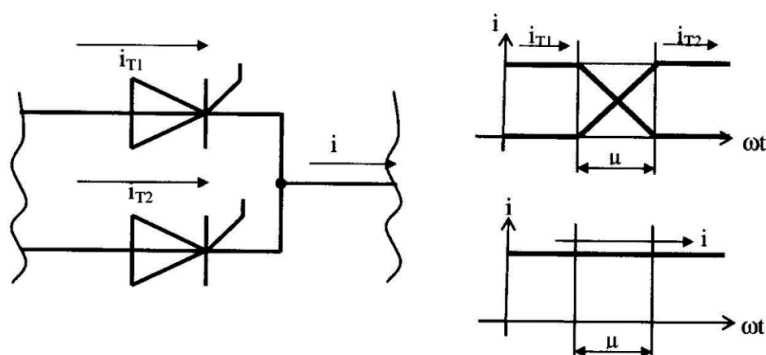
2.2 Polovodičové zdroje obecně - měniče

Prakticky každý polovodičový zdroj je měnič, což je zařízení na přeměnu forem energie. Statické měniče jsou měniče bez součástí, které by vytvářely mechanický pohyb. Pokud je měnič sestaven z polovodičových součástek, nazýváme je pak výkonový polovodičový měnič.

Základní členění dle funkce měniče je:

- usměrňovače - slouží k přeměně střídavého proudu na stejnosměrný;
- stejnosměrné měniče - slouží k přeměně stejnosměrného napětí na stejnosměrné. Obvykle jsou nazývány jako "pulzní měniče". Výstupní napětí může být větší i menší než vstupní;
- střídače - mění vstupní stejnosměrné napětí (proud) na výstupní střídavé.

Komutací větví měniče nazýváme děj, který charakterizuje přechod z jedné větve měniče na druhou, aniž by došlo k přerušení proudu odtékající z uzlu větví. Průběh napětí a proudu můžeme vidět na obr. 5. Dle způsobu komutace, rozdělujeme měniče na měniče s vnější a vlastní komutací. Měniče s vnější komutací se používaly především dříve. Dnes díky nástupu IGBT součástek (bipolární tranzistory s izolovaným hradlem) mluvíme především o měničích s vlastní komutací. Vnější komutaci pak můžeme dále rozdělit na síťovou komutaci nebo zátěžovou komutaci. V obou případech se komutace řídí vnějšími podmínkami střídavé strany měniče. Měniče s vlastní komutací pak mají zdroj komutačního napětí, který je součástí obvodu měniče (dnes obvykle příslušné řízení měniče). [4]



Obr. 5: Komutace větví měniče [4]

2.3 Usměrňovače

Usměrňovač je polovodičový měnič, který vhodným spínáním polovodičových prvků provádí přeměnu střídavé elektrické energie na energii stejnosměrnou. Musí si ho opatřit každý, kdo potřebuje stejnosměrnou energii, neboť žádná elektrárna tento druh energie nevyrábí. V elektrických stanicích usměrňovače slouží k nabíjení staničních akumulátorů a pokrytí spotřeby přístrojů se stejnosměrným napájením. Patří běžně mezi měniče s vnější komutací. Je to nejstarší druh používaných měničů s nejvíce rozpracovanou teorií. V nedávné minulosti patřily k nejpoužívanějším polovodičovým měničům z hlediska použití. Aplikace bývaly velmi různorodé - zdroje pro

stejnosemné pohony, trakční pohony, měnirny k napájení trakčního vedení, zdroje pro budící vinutí stejnosměrných a synchronních strojů, zdroje v elektrochemických procesech aj. Využití samotných usměrňovačů dnes již však klesá, díky masivnímu rozvoji nepřímých měničů kmitočtu. [4]

Usměrňovače lze dělit dle několika hledisek:

dle řízení:

- řízené;
- neřízené;

dle počtu fází:

- jednofázové;
- dvofázové;
- třífázové;
- vícefázové;

dle zapojení:

- uzlové;
- můstkové;

dle toku energie:

- energeticky jednosměrné;
- energeticky dvousměrné.

Usměrňovače se síťovou komutací můžeme dále rozdělit podle počtu pulzů výstupního napětí v jedné periodě napájecího napětí:

- jednopulzní;
- dvoupulzní;
- trojpulzní;
- šestipulzní;
- dvanáctipulzní;
- vícepulzní.

Zdrojem střídavého napětí pro usměrňovač je vždy rozvod střídavého napětí. Usměrňovač pak může být připojen přes transformátor (klasické řízené usměrňovače), přímo (u měničů kmitočtu) nebo přes tlumivku (usměrňovač, měnič kmitočtu). [4]

Pro usměrňovače je také velmi důležitý druh použité zátěže, na kterou musí být konstruován. Pro usměrňovače rozlišujeme tři druhy zátěže:

- odporovou (ohmickou);
- odporovou a indukční;
- kombinace odporové, indukční zátěže a ideálního zdroje napětí.

Usměrňovače používané v elektrických stanicích bývají většinou komplexní řízené jednotky s různými možnostmi nastavení a regulace výstupního napětí a proudu. (Obr. 6)



Obr. 6: Jednotka usměrňovače od výrobce Salicru Electronics typ FAC QP

2.4 Střídače

Převod elektrického stejnosměrného proudu na střídavý provádějí statické měniče nazývané se střídače. Tyto střídače představují širokou řadu měničů, které zahrnují velký počet používaných schémat. Můžeme je rozdělit dle tří základních hledisek:

podle způsobu komutace

- vnější;
- vnitřní;

podle počtu fází výstupního napětí:

- jednofázové;
- dvojfázové;
- třífázové;

podle druhu napájecího obvodu:

- střídače napěťové;
- střídače proudové.

Střídače s vnější komutací (komutované ze sítě)

Tyto střídače označujeme jako invertory. Jsou to v podstatě usměrňovače, které mají obrácený tok energie, to je ze stejnosměrného zdroje do sítě se střídavým napětím. Střídavá síť je totiž sama zdrojem komutačního napětí. Střídače mající vnější komutaci, pak nejsou vybaveny komutačními obvody. Tyto střídače se pak používají v elektrických pohonech s usměrňovači pro oboustranný přenos energie ze stejnosměrné strany na stranu střídavou a naopak. Zdrojem komutačního napětí na střídavé straně střídače nemusí být pouze síť veřejného střídavého napětí, ale může jím být též synchronní motor nebo asynchronní motor s doplněnými kondenzátory. Do speciální oblasti střídačů pak řadíme stejnosměrné přenosy elektrické energie HVDC (High Voltage Direct Current). Stejnosměrným meziobvodem se provádějí také propojení střídavých elektrických soustav s různým kmitočtem. [5]

Střídače s vnitřní (vlastní) komutací

Za střídače s vlastní komutací označujeme střídače, které mají zajištěnou komutaci obvody ve střídači. Obdobným způsobem, jako se používá u stejnosměrných měničů, je možné střídače doplnit vnitřními obvody, zabezpečující vypínání tyristorů v libovolném okamžiku. Dnes díky pokroku u vypínatelných součástek v jejich parametrech, se většinou u střídačů s vlastní komutací využívají pro vypínání součástky, které speciální komutační obvody nemají vůbec. Střídače takového druhu pak mohou být zdroji pro autonomní elektrické sítě, skládající se téměř z jakékoli zátěže. Používají se jako záskokové zdroje pro udržení napájení důležitých spotřebičů a přístrojů v chodu i po výpadku veřejné střídavé zásobovací sítě, ale taky jako zdroje s proměnným kmitočtem pro střídavé motory s proměnnými otáčkami. [5]

Napěťový střídač

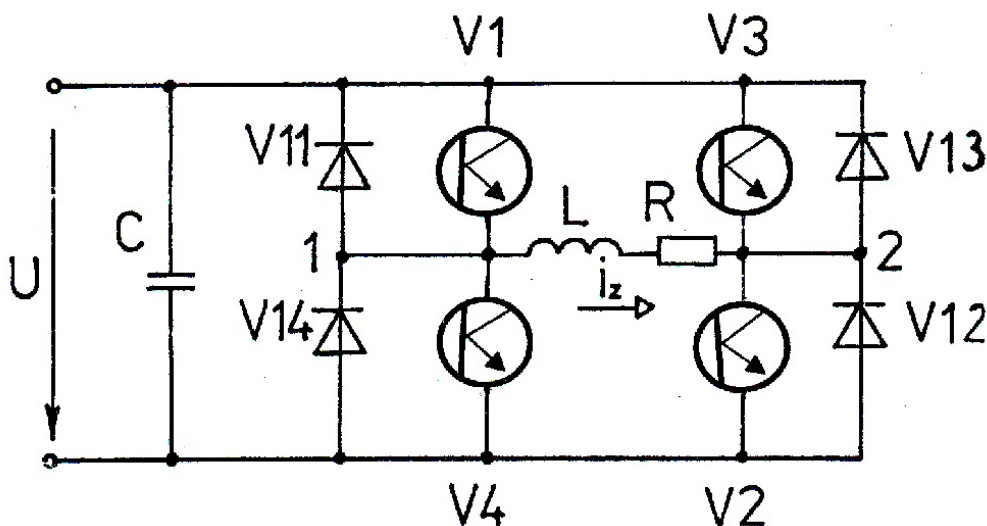
Pro napěťový střídač se využívá zdroj, mající malou vnitřní impedanci. Je to zdroj tvrdý, napěťový zdroj, mívá regulované nebo konstantní napětí na výstupu. Typickou částí napájecího zdroje pak bývá velký napěťový kondenzátor, sloužící jako zdroj špičkové energie. Hlavní energetický zdroj může být usměrňovač, který je napájený ze střídavé sítě, olověné akumulátory, sluneční baterie nebo také třeba magnetohydrodynamický generátor. Napěťovými střídači se dnes realizuje drtivá většina střídačů. Jsou to střídače v elektrických regulovaných střídavých pohonech, střídače ve zdrojích s regulací napětí a kmitočtu, střídače v záskokových zdrojích, střídače ve zdrojích u zařízení s indukčními ohřevy a střídače ve zdrojích kapacitního a indukčního VA výkonu. V těchto napěťových střídačích se dnes vedle klasických tyristorů, stále častěji používají vypínatelné GTO tyristory s výkonovými tranzistory. [5]

Proudový střídač

Proudové střídače jsou napájené zdroji s konstantním proudem. Typickou částí v obvodu tohoto napájecího zdroje je tlumivka. Tvar proudu v jednotlivých taktech u proudových střídačů není ovlivňován parametry obvodu, ale má tvar konstantního bloku proudu, jelikož je tvořen velkou indukčností. Proudové střídače a jejich součástky pak musí vydržet napětí, která způsobují přerušování proudu v indukčnosti zátěže. Tyto součástky jako GTO tyristory a tranzistory vyžadují při tomto použití zvětšené kondenzátory pro přepět'ové ochrany. Pak jsou tyto součástky tvořené GTO tyristory a tranzistory, při tomto použití vyžadují zvětšené kondenzátory pro přepět'ové ochrany. Nejširší zastoupení pak takové proudové měniče mají v elektrických pohonech se střídavými motory k napájení ventilových asynchronních nebo synchronních motorů s velkým výkonem pro pohony kompresoru. Dále také pro indukční ohřevy nebo také třeba pro rozběhová soustrojí přečerpávacích hydroelektráren. [5]

2.4.1 Jednofázový napět'ový střídač

Jelikož je tento typ střídače nejpoužívanější a je to také typ, který je v praktické části této práce měřen a testován, je v následujícím textu proveden jeho základní jednoduchý rozbor. Základní principiální schéma jednofázového střídače je na obr. 7.



Obr. 7: Schéma jednofázového napět'ového střídače [5]

Schéma se v principu podobá jednofázovému můstku s větvemi, které jsou tvořeny antiparalelním spojením spínačů $V1$, $V3$, $V4$, $V2$ a diod $V11$, $V13$, $V14$, $V12$. Vyobrazené spínače mohou být zrealizovány vypínatelnými tyristory nebo tranzistory (IGBT, GTO, IGCT). Vyobrazený jednofázový střídač řadíme mezi střídače s vlastní komutací. Je napájen zdrojem napětí U , kde je připojen kondenzátor C , který zvyšuje schopnost poskytovat energetické pulzy, aniž by došlo k poklesu napětí. Diagonálu obvodu tvoří zatěžovací RL obvod. [5]

Ohmická zátěž

Pokud se zátěž skládá pouze z odporu R , tak současným sepnutím spínačů $V1$ a $V2$ protéká tímto odporem kladný proud i_z . Po vypnutí $V1$ a $V2$ s následným zapnutím $V3$ a $V4$, proud i_z změní svou polaritu. Kmitočet napájecího napětí a proudu zátěže můžeme řídit podle spínání tyristoru. Odpořem bude protékat elektrický proud s obdélííkovým průběhem s délkou obdélííku π . Efektivní hodnota proudu a první harmonická proudu zátěže budou:

$$I_z = \frac{U}{R} \quad ; \quad I_{1z} = \frac{4U}{\pi R} \quad [A; V, \Omega]; [A; V, \Omega] \quad (2)$$

Délkou sepnutí dvojic tyristorů a délkou doby, kdy jsou všechny tyristory vypnuty, můžeme řídit velikost proudu a napětí. V úhlu sepnutí tyristorů Ψ bude tvar proudu odporem obdélník s délkou Ψ a prodlevou $\pi - \Psi$. Pak pro efektivní proud a napětí zátěže platí:

$$U_Z = U \sqrt{\frac{\Psi}{\pi}} \quad I_Z = \frac{U}{R} \sqrt{\frac{\Psi}{\pi}} \quad [V; V, -, -]; [A; V, -, \Omega, -] \quad (3)$$

Pokud má tedy zátěž pouze ohmický charakter, diody proud nepovedou, bude procházet jen spínači.

Průchod jalového výkonu střídačem

Průchod jalového výkonu je složitější a je nutný podrobnější výklad. Nám však postačí základní poznatky. Ve schématu si můžeme povšimnout, že ke každému tyristorovému spínači $V1$ až $V4$ je antiparalelně připojena jedna zpětná dioda. Jako celek vytváří zpětné diody takzvaný zpětný usměrňovač, který je svou střídavou stranou připojen k zátěži a stejnosměrnou stranou ke stejnosměrnému zdroji. Stejnosměrný zdroj napětíového střídače musí umožňovat změnu smyslu proudu. V obvodu vlastního střídače pak umožňují tyristorové spínače $V1 - V4$ průchod výkonu do zátěže a odběr jalového výkonu zátěží umožňuje zpětný usměrňovač. Zpětnými diodami musí být vybaven každý napětíový spínač. [5]

2.5 Zdroje nepřerušitelného napájení UPS

Zdroj nepřerušitelného napájení UPS (Uninterruptible Power Supply) je v podstatě zdroj složený z výše popsaných součástí, jako je usměrňovač, střídač a akumulátorová baterie. Obsahuje také spínače a měniče, takže celkově vytváří systém k zajištění nepřerušeného napájení zátěže, když v napájecí střídavé síti dojde k poruše. Výraz nepřerušené napájení chápeme jako udržení napětí a kmitočtu elektrické energie ve jmenovitých mezích nejen pro ustálený, ale také pro přechodný stav.

Usměrňovač (rectifier), popsaný v předchozím textu (viz kapitola 2.3), slouží k usměrnění napájecí sítě a dobíjení akumulátoru, který bývá většinou součástí tohoto zdroje. Můžeme jen říct, že bývá realizován jako diodový (neřízený), kde řízení nabíjecího procesu zajišťuje přídavný měnič, tyristorový nebo s pulsně šířkovou modulací.

Střídač (inverter) byl již popsán v předchozích kapitolách (viz kapitola 2.4.1). Opět lze jen konstatovat, že střídač bývá buď tranzistorový, kde výstupní střídavé napětí je buďto obdélníkové s limitovanou strmostí náběžných hran nebo může být sinusový, kde obsah harmonických nesmí převýšit stanovené meze veřejné rozvodné sítě. Požadovaná stabilizace výstupního napětí a kmitočtu a v některých případech i synchronizace ze sítě. Střídače mohou být jednofázové nebo trojfázové.

Akumulátorová baterie v UPS jednotce slouží jako zásobník energie pro zálohování napájecí sítě a bývá v provedení několika propojených článků. V samostatných jednotkách UPS se s největší pravděpodobností setkáme s uzavřeným článkem bez negativního vlivu na okolí. Většinou je konstrukční součástí této jednotky. U zdrojů s velkým výstupním výkonem může tvořit samostatný celek ve stavebnicovém provedení. Zálohovací dobu nám pak stanoví kapacita těchto baterií. Tu pak stanovíme dle požadované délky zálohovací doby.

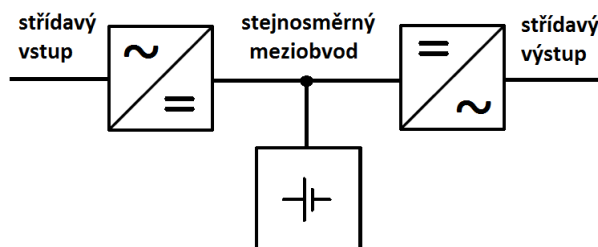
Obtok (bypass) je označením pro náhradní vedení elektrické energie, které je paralelně zřízené k jednotce UPS. Tento obtok umožní přemostění jednotky UPS automaticky při přetížení nebo v případě poruchy jednotky UPS. Ruční – servisní obtok nám umožní bezpečné oddělení UPS při servisu.

Spínač UPS (switch) slouží k odpojení nebo připojení UPS nebo obtoku. Může být v provedení elektronickém, elektromechanickém nebo hybridním. Může mít ruční nebo automatické ovládání. O tomto provedení pak rozhoduje klasifikace UPS dle dynamických výstupních vlastností. Při

použití více zdrojů je použito několika takových spínačů pro převedení proudové cesty z jednoho zdroje na druhý. [6]

Základní kategorie UPS

Prostý UPS (single UPS) tvoří jediná jednotka UPS (obr. 8). Tato jednotka je složena z baterie, usměrňovače, který ji nabíjí a ze střídače.



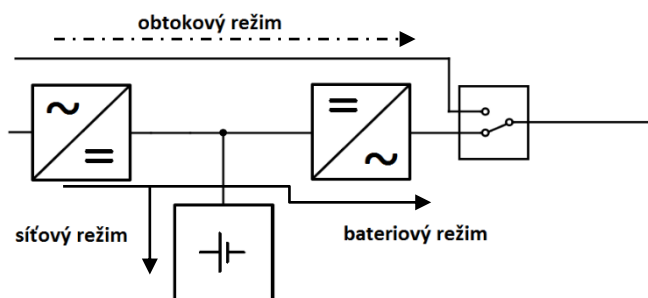
Obr. 8: Prostá UPS

Paralelní UPS (parallel UPS) jednotky jsou složeny z několika paralelně zapojených jednotek UPS a jejich střídače jsou synchronizovány. Bývají opatřeny jednotkou pro rozdělení výkonu. Můžeme se setkat i se systémem částečně paralelních UPS (partial-parallel UPS), kde tyto jednotky mají stejnosměrný meziobvod s baterií a usměrňovačem společný. Střídače jsou pak řazeny paralelně. Obě tato provedení jsou provozována jako jediná UPS jednotka, která může být doplněna obtokem.

Redundantní UPS (redundant UPS) jednotky jsou realizovány několika UPS jednotkami, pro zvýšení spolehlivosti zálohování. Každá jednotka musí být dimenzována na jmenovitý výkon zátěže. Jedna jednotka je trvale v provozu a všechny ostatní jsou v pohotovosti. Aktivují se až v případě poruchy nebo přetížení. Pokud je tento systém vybaven obtokem, je jeho spolehlivost vyšší. Jejich střídavé vstupy mohou být propojeny. [6]

Funkční typy UPS

UPS s dvojitou přeměnou (UPS double-conversion) je realizována prostou UPS (obr. 9).



Obr. 9: UPS dvojitá konverze

Může být realizována:

- normální sítový režim – sítové napětí je v mezích tolerance, usměrňovač nabíjí baterii a střídač, ze kterého je napájena zátěž;
- zálohovací bateriový režim – sítové napětí je mimo toleranci, usměrňovač je neaktivní a střídač dodává výkon do zátěže, přičemž čerpá energii z baterie;
- obtokový režim – sítové napětí je v mezích tolerance, ale UPS je odpojena, protože je přetížena nebo má poruchu. Zátěž je napájena ze sítě.

Tento typ je napětově a kmitočtově nezávislý na sítovém přívodu s výjimkou zapojení obtoku. Význam má zejména pro systémy v oddělených napájecích soustavách. Energie v normálním režimu

prochází dvojí přeměnou: AC/DC/AC, dle čehož je odvozen název tohoto typu. Střídač je tak stále v provozu, přechod mezi napájením se děje bez přechodných jevů na výstupu. Dle stavového označení byl tento systém označován jako „on-line“. [6]

V elektrických stanicích je toto nejčastěji provozovaný způsob zajištěného střídavého napájení, pro důležité obvody. Pokud není použita UPS, je nahrazena střídačem, řídicí a spínací jednotkou s obtokem (*obr. 17*) a usměrňovačem, který nabíjí staniční akumulátory.

Síťově interaktivní UPS (UPS line interactive) je jako v předchozím případě prostá UPS, ale je provozována způsobem:

- normální síťový režim – síťové napětí je v toleranci, zátěž je připojena na síť. Toto síťové napětí je však upraveno přizpůsobovacím členem (line interface) což může být ferorezonanční stabilizátor nebo transformátor s přepojováním odboček. Tímto způsobem jsou zvýšeny toleranční meze síťového napětí, šetří se kapacita baterií. Střídač je synchronizován se sítí, ale ve stavu bez zatížení (naprázdno) nebo částečně upravuje síťové napětí;
- zálohovací bateriový režim – síťové napětí překročilo toleranční mez a střídač napájí zátěž z baterie;
- obtokový režim – síťové napětí je v toleranci, ale UPS je odpojena, protože je přetížena nebo má poruchu. Zátěž je napájena ze sítě. [6]

Tento typ je napětově a kmitočtově nezávislý na síťovém přívodu pouze v bateriovém režimu. V obtokovém zapojení je výstupní napětí a kmitočet shodný se sítí. Výstup je napětově nezávislý v síťovém režimu při vstupním síťovém kmitočtu. Do této skupiny se řadí jak jednoduché zdroje s hrubou regulací vstupního napětí tak i zdroje s bez spínacovým plynulým přechodem mezi sítí a bateriovým napájením s přesným řízením výstupního napětí. Používají se tedy pro nenáročné spotřebiče (jednoduché zdroje), tak pro spotřebiče vyšších výkonů s velmi kvalitními zdroji.

Pasivně pohotovostní UPS (UPS passive stand-by) jsou opět prosté UPS, které provozovány:

- normální síťový režim – síťové napětí je v toleranci. Zátěž je připojena na síť přes obtok. Síťové napětí může být upraveno odbočkovým transformátorem nebo jiným přizpůsobovacím členem. Střídač je mimo provoz;
- bateriový zálohovací režim – síťové napětí je mimo toleranci a po odpojení síťového vstupu se střídač aktivuje a napájí zátěž. [6]

Zdroje provozované tímto způsobem jsou kmitočtově a napětově nezávislé jen v zálohovacím režimu. Zátěž je v síťovém režimu napájena síťovým napětím a kmitočtem. Pokud zdroj obsahuje odbočkový transformátor (přizpůsobovací člen) může být výstupní napětí na vstupní síti částečně nezávislé. Obtok se zde nepoužívá. Vznikají zde přechodné jevy při přechodu mezi síťovým a bateriovým režimem. Zálohuje tedy ne příliš náročné spotřebiče. Bývají označovány jako off-line.

Řídicí systém UPS

Jednotky UPS jsou většinou vybaveny řídicím systémem, který zajišťuje mimo základní funkce i mnoho jiných funkcí, zaměřených hlavně na vyšší spolehlivost zálohovacího systému. Tento systém řídí hlavně velikost, tvar a frekvenci výstupního napětí. Dále pak přechody mezi síťovým, bateriovým a obtokovým režimem. Mimo jiné může také řídit ochranu zařízení před přepjetím, přetížením, hlubokým vybitím baterie nebo nadměrným oteplením. U redundantních systémů obstarává včasnou aktivaci náhradního napájení. U dražších zařízení mají řídicí systémy funkci protokolování provozních událostí. V případě zálohování počítačových nebo jiných elektronických systémů mohou řídicí systémy připojené na datovou síť poskytovat informace o přechodu na bateriový režim a o zbývajícím době zálohovacího režimu. Pokud dojde k vyčerpání energie, mohou tyto systémy řízeně odstavit (shutdown). [6]

V předchozím textu byly vysvětleny základní druhy a funkční typy UPS. Norma ČSN EN 62040-3 uvádí ještě další rozdělení dle tvaru výstupního napětí a stupně ochrany zařízení (*tab. 1*).

Tab. 1: Klasifikace UPS podle normy ČSN EN 62040-3 v závislosti na stupni ochrany zařízení [7]

Stupeň ochrany		Druh síťových poruch		Čas	Klasifikace UPS (ČSN EN 62040-3)			Používaná klasifikace
					Výstupní závislost na síťovém napájení	Tvar výstupní vlny/ Tvar napětového zkreslení *	Výstupní tolerance**	
1	Ochrana vůči třem rušivým vlivům sítě	1	Výpadky proudu	> 10 ms	VFD - napětové a frekvenčně závislé na napájení sítě	SY = na výstupu UPS není napětí sinusového průběhu SX = není sinusový, THD > 0,08	333/ 332/ 322	Off-line
		2	Kolísající napětí	< 16 ms				
		3	Napětové špičky	< 16 ms				
2	Ochrana vůči pěti rušivým vlivům sítě	4	Dlouhodobé podpětí	Spojité	VI = Napětově nezávislé na napájení sítě	SX = není sinusový, THD > 0,08 nebo SS sinusový, THD < 0,08	322/ 311	Line- interactive
		5	Dlouhodobé přepětí	Spojité				
3	Ochrana vůči všem deseti rušivým vlivům sítě	6	Účinky blesku	Ojedinělé	VFI - napětové a frekvenčně nezávislé na napájení sítě	SS sinusový, THD < 0,08	211/ 111	On-line
		7	Přepětová ochrana, přepětí	> 4 ms				
		8	Změny kmitočtu	Nepojivé				
		9	Napětové zkreslení "burst"	Periodické				
		10	Harmonické zkreslení	Spojité				
4	Ochrana vůči všem deseti rušivým vlivům sítě + zvýšená ochrana díky galvanickému oddělení	1 - 10 (všechna uvedená)		Všechna uvedená	VFI - napětové a frekvenčně nezávislé na napájení sítě	SS sinusový, THD < 0,08	111	On-line
5	Ochrana vůči všem deseti rušivým vlivům sítě + zvýšená ochrana díky galvanickému oddělení + paralelně-redundantní N+1	1 - 10 (všechna uvedená)		Všechna uvedená	VFI - napětové a frekvenčně nezávislé na napájení sítě	SS sinusový, THD < 0,08	111	On-line

* SX - první znak "S" odpovídá napětíové vlně na vstupu UPS (sinus), druhý znak "X" je z (nesinusového) výstupu UPS, THD.

** Trojčíslí "nnn" hodnotí dynamické chování (přechodné odchylky vstupního napětí) při změně provozního režimu (první "n") nebo skokové změně zátěže (druhé "n" - lineární, třetí "n" nelineární zátěž), kde "n" je hodnota od 1 (nejpřísnější tolerance, bez přerušení - kontinuální provoz) do 3 (nejméně přísná tolerance s přerušením do 10 ms).

2.6 Motorgenerátory

Soustrojí nazývané motorgenerátor je mechanickým spojením dvou strojů, motoru a generátoru. Toto rotační soustrojí nachází uplatnění všude tam, kde není přivedeno síťové napájení, případně tam, kde je potřeba nahradit náhlé delší výpadky elektrické energie. Spalovací motor vytváří točivý moment v soustrojí motorgenerátoru a alternátor převádí kinetickou energii na elektrickou energii. Dobu zálohování u motorgenerátorů je možno prodloužit externí nádrží s automatickým přečerpáváním paliva. Palivem pro motorgenerátory může být nafta, zemní plyn, benzín a případně i bioplyn. [8]

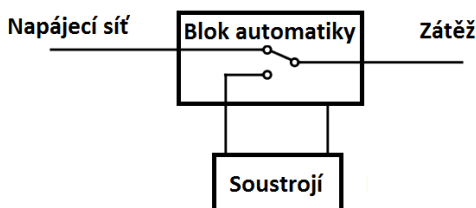
Motorgenerátory mají tyto základní části:

- soustrojí motor-alternátor se zpětnovazebním řízením upevněné v rámu;
- palivová nádrž - jsou různých velikostí dle daného typu a výkonu motorgenerátorů (pro provoz obvykle do 10 hodin bývá zpravidla v rámu soustrojí, externí samostatnou nádrží s přečerpávacím systémem se u motorgenerátoru větších výkonu dosahuje delší doby chodu);
- startovací systém;
- chladič systém (chlazení vzduchem nebo vodou);
- blok automatiky.

Motorgenerátory se dále podle funkčního módu rozdělují:

- provoz jednoho zdroje (single-mode);
- záskokové zdroje (spouštějí se pouze při výpadku vstupního napětí);
- stále pracující zdroje (v místech, kde není k dispozici síťové napětí, v návrhu těchto zdrojů je zohledňováno opotřebení díky trvalému provozu);
- kogenerační jednotky (dodávají elektrickou energii a zároveň využívají odpadní teplo pro ohřev například užitkové vody);
- provoz dvou nebo více paralelních zdrojů (multi-mode).

Motorgenerátory jsou většinou koncipovány jako záskokové zdroje, tzn., že dodávají energii až po výpadku síťového napětí. Po spuštění motoru dochází ke stabilizaci úrovně a frekvence napětí vyráběné alternátorem. Zhruba po 10 vteřinách, po dosažení napětí alternátoru v mezích tolerance, dodává motorgenerátor energii do připojených rozvodů. Většinou se motor spouští automaticky s možností regulace prodlevy startu tak, aby při velmi krátkých výpadcích nedocházelo ke startu motoru. (obr. 10) [8]



Obr. 10: Principiální schéma motorgenerátoru s blokem automatiky [8]

Blok automatiky zastává tyto hlavní funkce:

- start - stop motoru a opakování nezdařeného startu;
- připojení a odpojení napětí motorgenerátoru do rozvodu elektrické energie;
- kontrola provozních veličin (teplota, tlak, olej, apod.);
- dobíjení startovacích baterií;
- měření provozních veličin (napětí, proud, frekvence, motohodiny).

Za pomoci automatiky se nastavují tyto režimy činnosti motorgenerátoru:

- ruční START-STOP;
- automatický režim - soustrojí automaticky startuje při výpadku napájecí sítě a po obnovení se automaticky zastaví;
- TEST režim - pro kontrolu správné činnosti se soustrojí spustí, ale spotřebiče však odebírají energii z napájecí sítě;
- úplné odstavení motorgenerátoru.

Z hlediska zakrytí motorgenerátory dělíme:

- bez zakrytí - pro umístění do strojovny - klasické otevřené provedení (hlučnost 90 - 105 dB) - slouží k zástavbě do strojovny motorgenerátoru;
- s krytím bez odhlučnění – zde je zakryto soustrojí, ale neobsahuje protihlukovou izolaci;
- s krytím (kapotováním) a protihlukovou izolací - vnější zakrytí (kapotování) soustrojí omezuje hlučnost soustrojí na úroveň 70-75 dB a zároveň také omezuje nepříznivé vlivy počasí na motorgenerátor. Takovéto provedení je vhodné do obytných oblastí a do prostor s požadavkem na nízkou hladinu hlučnosti;
- kontejnerové provedení - soustrojí je umístěno ve speciálním ocelovém kontejneru, jenž zcela nahradí strojovnu motorgenerátoru. [8]

Způsoby startu motorgenerátorů:

- elektrický start – za pomoci elektrického startéru a baterie;
- pneumatický start – obvykle pro výkon nad 1 MVA;
- ruční – pro malé výkony za pomoci řemene.

Motorgenerátory krytované i kontejnerové jsou koncipovány pro použití na volném prostranství. Aplikace, které je zapotřebí odhlučnit, využívají zejména kontejnerové verze motorgenerátorů. Tyto kontejnerové verze zároveň chrání proti zásahu nepovolaných osob a před nepříznivými klimatickými podmínkami. [8]

Určení výkonu a znalost zátěže

Určit výkon motorgenerátoru je možné dle několika faktorů. Zejména velikostí, charakterem a chováním napájené zátěže. Abychom mohli stanovit jmenovitý výkon, je třeba znát parametry alespoň u nejvýznamnějších spotřebičů. Je to instalovaný výkon, rozběhový proud, koeficient soudobosti, účinník a činitel harmonického zkreslení vstupního proudu. Vlastnosti soustrojí pak určují toleranci náhradního zdroje vůči skokově připojovaným zátěžím. [8]

Samostatně pracující synchronní generátor – zatěžovací charakteristiky

V předešlé části byl uveden popis základních částí a rozdělení motorgenerátorů, z celkového pohledu záskokových zdrojů. Z důvodu srovnávacího měření malé mobilní elektrocentrály v praktické části, je nutné rozumět i vlastnostem generátorické části stroje při možných zatíženích. Jelikož se asynchronních strojů u motorgenerátorů prakticky neužívá, není zapotřebí jeho vlastnosti popisovat. Teoreticky rozebrat funkci a konstrukci celého synchronního stroje přesahuje rámec této práce, proto jsou popsány pouze provozní stavy synchronního stroje při určitých zatíženích, jako samostatně pracujícího generátoru.

Synchronní generátor je indukční stroj a jeho výstupní parametry jsou závislé na charakteru zatížení. Pokud je stroj zatížen induktivně, je tzv. přebuzený a pokud je zatížen kapacitně, pak je podbuzený. Jeho charakteristické vlastnosti popisují tzv. zatěžovací a regulační charakteristiky. Základní zatěžovací charakteristikou je závislost svorkového napětí U na zatěžovacím proudu statorového vinutí I . Uvažujeme konstantní účinník, neměnný budící proud, neměnné otáčky a tím i neměnnou frekvence. Taková charakteristika nám pak udává změnu napětí na svorkách zatíženého alternátoru v závislosti na proudu dodávaného do obvodu. Tato charakteristika se označuje vnější. Je určená synchronní reaktancí stroje X_d (tato reaktance vychází ze zjednodušeného schématu synchronního stroje). Tuto synchronní reaktanci považujeme za konstantní při zanedbaném odporu statorového vinutí. U_b označuje vnitřní indukované napětí ve statoru, vyvolané budícím proudem.

Platí vztah:

$$U = U_b + j X_d \cdot I \quad [V; V, \Omega, A] \quad (4)$$

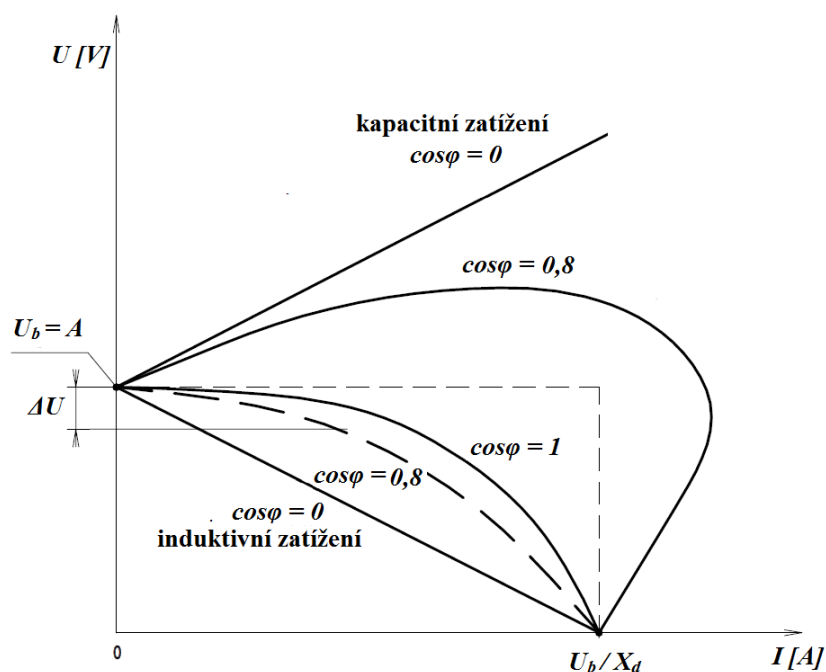
Pokud zátěž bude pouze činná ($\cos\varphi = 1$) platí rovnice elipsy:

$$U^2 + (X_d \cdot I)^2 = U_b^2 \quad [V, \Omega, A; V] \quad (5)$$

Pro jalové zatížení ($\cos\varphi = 0$) platí rovnice přímky:

$$U \pm X_d I = U_b \quad [V, \Omega, A; V] \quad (6)$$

Na *obr. 11* vidíme, že křivky při jakémkoli účinníku vycházejí z bodu A, který odpovídá napětí naprázdno, při stanoveném budícím proudu. Pro čistě induktivní zatížení přímka klesá k bodu U_b / X_d (stav nakrátko) a při čistě kapacitním zatížení přímka narůstá až k bodu $U = 2U_b$. Lze konstatovat, že výstupní napětí je závislé na charakteru zátěže a její velikosti. Pokud tedy máme stroj zatížen do kapacity (jedná se o podbuzený stav, chová se jako indukčnost), pak dochází k takzvanému samobuzení generátoru a výstupní napětí poté stoupá. Při induktivní zátěži napětí klesá. Kapacitní zatížení stroje je tedy velmi nebezpečný stav, protože zvyšující se napětí ohrožuje izolační systém. [9]



Obr. 11: Vnější charakteristika zatíženého alternátoru [9]

3 Měření malých zdrojů nízkého napětí

Statické charakteristiky, jak už název napovídá, vyjadřují statické vlastnosti zdrojů. Obvykle je rozlišujeme na:

- zatěžovací charakteristiky;
- převodní charakteristiky.

Zatěžovací charakteristiky vyjadřují závislost výstupního napětí na výstupním proudu a získávají se měřením nebo výpočtem. Běžně bývá udávána řada charakteristik, avšak parametrem každé charakteristiky v řadě bývá řídicí veličina.

Převodní charakteristika je závislost výstupní veličiny (např. napětí) na řídicí veličině. Převodní charakteristiky může představovat také řada parametrických křivek, kde je parametrem další výstupní veličina, například proud nebo hodnoty zátěže.

3.1 Statické a pseudo-statické zatěžovací charakteristiky zdrojů

Jednou z hlavních náplní této diplomové práce jsou takzvané pseudo-statické charakteristiky. Díky rozvoji automatických měřicích systémů a přístrojů je dnes možné tyto charakteristiky měřit na elektrických zařízeních způsobem, kdy se na testovaném objektu měří kontinuálně s periodickým záznamem všechny potřebné veličiny. Měníme pouze parametry zkoumaného objektu, jejichž závislost zjišťujeme. Periody záznamu jsou však několikanásobně delší, než vnitřní časové konstanty měřených zařízení. [10]

Pokud zkoumáme pseudo-statické charakteristiky za pomoci obecné nízkonapěťové střídavé zátěže, jsou na ni kladeny specifické požadavky:

- velký regulační rozsah
- plynulá regulace (z důvodu neporušené stacionarity měření)

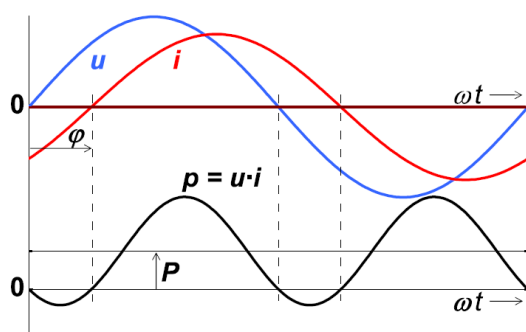
V dalších kapitolách budou uvedeny navržené druhy těchto zátěží, zároveň s postupem měření.

3.2 Matematické vyjádření měřených veličin

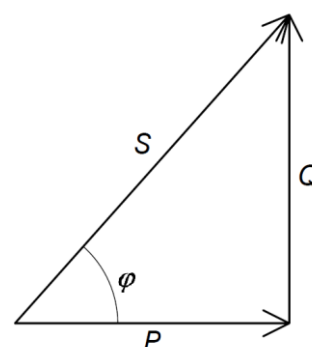
Abychom mohli správně dimenzovat testovací zátěže připojované k měřeným zdrojům, je třeba znát základní matematické vyjádření měřených veličin a porozumět výrazu harmonické zkreslení.

Výkony v lineárních a nelineárních jednofázových střídavých obvodech

Pokud máme v obvodě připojenou zátěž, tvořenou dvoupólovým $R-L-C$ obvodem, dochází k fázovému posunu φ vzhledem k napětí. Z průběhů na *obr. 12* je patrný okamžitý výkon p , který nabývá záporných hodnot, když energie proudí opačným směrem, ze zátěže do zdroje. Je to ve chvílích, kdy se vybíjejí energie z tlumivek a kondenzátorů. [11]



Obr. 12: Průběh výkonu v jednofázovém systému se sinusovými průběhy [11]



Obr. 13: Trojúhelník výkonů [11]

Činný výkon v obvodu vyjadřuje spotřebovanou energii. Jeho okamžitou hodnotu pak spočítáme:

$$p = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t) \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad [\text{W}; \text{V}, \text{A}] \quad (7)$$

Tento vztah můžeme upravit do tvaru:

$$p = U \cdot I \cdot \cos \varphi - U \cdot I \cdot \cos(2\omega t - \varphi) \quad [\text{W}; \text{V}, \text{A}, -] \quad (8)$$

První člen výrazu (8) nám představuje konstantní složku, která posunuje střídavou složku nad vodorovnou osu. Druhý člen tohoto výrazu pak představuje střídavou složku s dvojnásobným kmitočtem sítě. Činný výkon se spočítá jako střední hodnotu průběhu okamžitého výkonu a jelikož má druhý člen střední hodnotu nulovou, je tento výkon dán pouze prvním členem výrazu (8).

Můžeme činný výkon zapsat ve výrazu:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad [\text{W}; \text{V}, \text{A}, -] \quad (9)$$

Periodicky přelévající se energie výkonu mezi zdrojem a zátěží, což je střídavá složka okamžitého výkonu, pak reprezentuje jalový výkon Q (reactive power) :

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad [\text{var}; \text{V}, \text{A}, -] \quad (10)$$

Zdánlivý výkon můžeme poté spočítat:

$$S = \sqrt{(U \cdot I \cos \varphi)^2 + (U \cdot I \sin \varphi)^2} \quad [\text{VA}; \text{V}, \text{A}] \quad (11)$$

Zdánlivý výkon S lze také odvodit z trojúhelníku výkonů na obr. 13:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [\text{VA}; \text{W}, \text{var}] \quad (12)$$

V jednofázovém střídavém obvodu pak vypočítáme zdánlivý výkon S jako součin efektivní hodnoty napětí a proudu:

$$S = U \cdot I \quad [\text{VA}; \text{V}, \text{A}] \quad (13)$$

Účinník (power factor) je definován jako poměr činného výkonu P k výkonu zdánlivému S :

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad [-; \text{W}, \text{VA}] \quad (14)$$

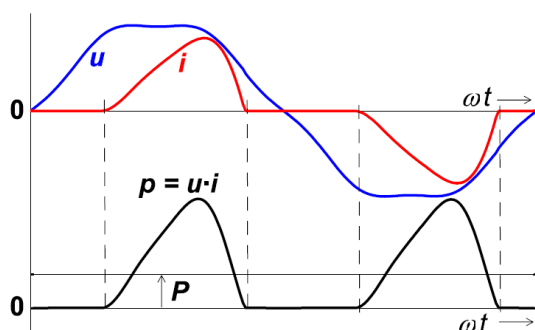
Pokud by průběhy napětí a proudů byly sinusové, pak by se účinník $\cos\varphi$ rovnal fázovému posunu napětí a proudu.

Jelikož každý obecný periodický spojitý neharmonický průběh lze pomocí Fourierovy řady rozložit na složky jednotlivých harmonických průběhů, pak v jednofázovém obvodu s obecnými průběhy napětí a proudu dle obr. 14, bude okamžitý výkon tvořen řadou součinů, kde se každý člen řady složek proudu násobí každým členem z řady složek napětí. Pro činný výkon P mají ale význam složky s nenulovou střední hodnotou. Pak je činný výkon roven součinu stejnosměrné složky a součinu složek proudu a napětí, kde:

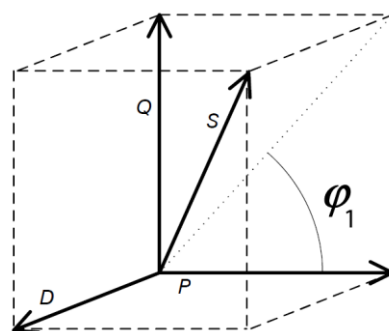
h - je řád harmonické složky napětí nebo proudu,

φ_h - je fázový posun harmonické složky proudu proti odpovídající harmonické složce napětí

$$P = U_0 \cdot I_0 + \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \cos\varphi_h \quad [W; V, A, -] \quad (15)$$



Obr. 14: Výkony v jednofázovém obvodu s obecnými průběhy proudu a napětí [11]



Obr. 15: Grafické vyjádření vztahu mezi výkony [11]

Zdánlivý výkon takového obvodu pak vyjádříme součinem efektivních hodnot proudu a napětí, kde každá z nich je tvořena efektivní hodnotou jednotlivých harmonických složek napětí a proudu.

$$S = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} U_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} I_h^2} \quad [VA; V, A] \quad (16)$$

Pokud budeme předpokládat, že je napájecí síť dostatečně tvrdá, můžeme průběh napětí považovat za sinusový, se zanedbatelným obsahem stejnosměrných a harmonických složek. Poté $U = U_1$ a můžeme tedy zapsat:

$$P = U \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 \quad [W; V, A, -] \quad (17)$$

Účinník poté bude roven:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{U \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1}{U \cdot I} = \frac{I_1}{I} \cdot \cos\varphi_1 \quad [-; A, A, -] \quad (18)$$

Účinník je v takovém případě dán součinem činitele základní složky proudu (I_1/I) a kosinem fázového posunu základní složky proudu proti napětí. Zdánlivý výkon můžeme vyjádřit:

$$S = \sqrt{(U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1)^2 + (U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1)^2 + U_1^2 \cdot \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad [\text{VA}; \text{V}, \text{A}, -] \quad (19)$$

Tento výraz (19) je roven výrazu, kde D je deformační výkon, který je tvořen zdánlivým výkonem harmonických složek proudu:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad [\text{VA}; \text{W}, \text{var}, \text{VA}] \quad (20)$$

Vztah mezi deformačním, zdánlivým, činným a jalovým výkonem vidíme na *obr. 15*. Zdánlivý výkon zde zobrazuje úhlopříčka kvádrů o hranách Q , P a D .

Aby bylo možné vhodně dimenzovat zátěže testovaných zdrojů v dalších kapitolách této práce, potřebujeme znát impedanci obvodu. Impedance obvodu Z je komplexní veličina a vyjádříme ji:

$$Z = |Z|\cos\varphi + j|Z|\sin\varphi = R + jX = \frac{U}{I} \quad [\Omega; \text{V}, \text{A}] \quad (21)$$

Absolutní hodnota impedance Z :

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad [\Omega; \Omega, \Omega] \quad (22)$$

Pokud budeme zdroje zatěžovat kapacitní nebo induktivní zátěží, potřebujeme znát reaktanci jednotlivých zátěží. Pro kapacitní reaktanci platí vztah:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad [\Omega; \text{Hz}, \text{F}] \quad (23)$$

Induktivní reaktanci vypočteme:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad [\Omega; \text{Hz}, \text{H}] \quad (24)$$

Pro výkony v jednotlivých obvodech se poté budeme řídit dle vztahů (9), (10), (11).

Příklad výpočtu:

Pokud použijeme kondenzátor o kapacitě 80 μF , jeho reaktance bude dle vztahu (23):

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 8 \cdot 10^{-6}} = 39,78 \Omega$$

Poté kapacitní jalový výkon Q , při napětí 230 V, s předpokladem čistě jalového zatížení (napětí se zpožďuje za proudem, $\sin\varphi = -1$) vypočteme:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi = 230 \cdot \frac{230}{39,78} \cdot (-1) = -1329,8 \text{ var}$$

Celkové harmonické zkreslení

THD je veličina definující zkreslení sinusového signálu. Toto označení je zkratkou Total Harmonic Distorsion, což překládáme jako celkové harmonické zkreslení. Pro harmonické nezkreslené průběhy je toto zkreslení rovno nule. Při praktickém výpočtu zkreslení, lze harmonické složky vyšších řádů lze zanedbat (40 až 50). Celkové harmonické zkreslení pak vypočítáme jako poměr hodnoty harmonických dané veličiny do 40. řádu harmonické k efektivní hodnotě základní harmonické. Pro celkové harmonické zkreslení napětí a proudu platí výrazy:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} \cdot 100; \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_1} \cdot 100 \quad [\%; V, V]; [\%; A, A] \quad (25)$$

Činitelem harmonického zkreslení *THF* vyjádříme poměr efektivní hodnoty obsahu harmonických a efektivní hodnoty střídavé veličiny. Poté pro činitele harmonického zkreslení platí výrazy:

$$THF_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U} \cdot 100; \quad THF_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I} \cdot 100 \quad [\%; V, V]; [\%; A, A] \quad (26)$$

Někdy také posuzujeme velikosti jednotlivých harmonických složek napětí a proudu, pak používáme jejich poměrné hodnoty k základní harmonické:

$$u_h = \frac{U_h}{U_1}; \quad i_h = \frac{I_h}{I_1} \quad [-; V, V]; [-; A, A] \quad (27)$$

3.3 Měřicí systém a testované zdroje

Aby bylo možné zdroje zatěžovat činným a jalovým výkonem, pro měření různých provozních stavů testovaných zdrojů byl nutný výběr vhodných měřících přístrojů a zátěží. Bylo tedy třeba vybrat obecnou lineární zátěž R-L-C, u které je možno spojitě regulovat činnou a jalovou složku a také vhodnou nelineární zátěž, která by mimo jiné reprezentovala i vlastnosti spínaných zdrojů.

3.3.1 Měřicí přístroj

Pro měření všech charakteristik byl využit sdružený analyzátor sítí BK-ELCOM v provedení ENA330 a ENA500.12 (*obr. 16*). Tyto analyzátory jsou součástí komplexního modulárního systému BK-ELCOM pro monitoring a analýzu kvality elektřiny v souladu s platnými normami. Tato koncepce je založena na bázi technologie virtuální instrumentace. Základem těchto přístrojů jsou tedy výkonné PC a firmware (softwarová aplikace). Vyhodnocovacím intervalem analyzátoru je 10 period měřeného signálu. Pro frekvenci signálu 50 Hz je tedy interval záznamu 200 ms. Analyzátor měří kontinuálně, bez přerušení. Pro záznam rychlých přechodových dějů je možné využít záznam v režimu tranzientního zapisovače (transient recorder) se vzorkovací frekvencí 9600 vzorků za vteřinu.



Obr. 16: Síťový analyzátor BK-ELCOM ENA500.12
Zdroj: <http://www.elcom.cz>

3.3.2 Testované zdroje

Byly vybrány dva dostupné zdroje, které jsou typické pro napájení zajištěného rozvodu střídavého napětí 230 V v elektrických stanicích. Jedním byl spínaný jednofázový sinusový střídač německého výrobce Benning, typ G110 E230/10,9/2 rfg-PWE řady Tebevert III (dále jen Benning Tebevert) s maximálním výstupním proudem 10,9 A (obr. 17). Tento střídač je umístěn v elektrické stanici (rozvodně) 110/22 kV Vsetín, v majetku ČEZ Distribuce, a. s. Napájí všechny důležité elektrické obvody vlastní spotřeby, jako je řídicí systém, signalizační obvody, elektronický zabezpečovací systém, atd. Tento střídač je napájen staniční baterií 110 V a je doplněn o elektronickou řídicí a přepínací obtokovou (bypass) jednotku, která však nebyla součástí měření. Díky dostupnosti vnitřního schéma (viz. příloha 1), je možné pozorovat princip základního zapojení, popsaného v kapitole 2.4.1.



Obr. 17: Střídač Benning řada Tebevert III s řídicí a přepínací obtokovou (bypass) jednotkou

Druhým zdrojem, umístěným taktéž v elektrické stanici 110/22 kV Vsetín ČEZ Distribuce, a. s., byl zdroj nepřerušitelného napájení (UPS) slovenského výrobce Elteco, typ PS30T7 (*obr. 18*) s maximálním výstupním proudem do činné zátěže 7,4 A. Zdroj je použit pro napájení nouzového osvětlení a požárních ventilátorů ve stanici. Součástí tohoto zdroje je obtokový (bypass) obvod a má taktéž sinusový průběh výstupního napětí. Stejně jako předchozí zdroj je napájen ze staničních baterií 110 V.



Obr. 18: Zdroj nepřerušitelného napájení (UPS) Elteco PS30T7

Jako třetí zdroj byla testována třífázová benzínová elektrocentrála italské firmy PRAMAC, typ ES 5000 (*obr. 19*) o jmenovitém trvalém výkonu (COP) 5,36 kVA. Tento zdroj není typickým zdrojem používaným v elektrických stanicích, přesto s jejich provozem souvisí. Testovaný kus se dle potřeby využívá jako mobilní zdroj elektrické energie, například pro napájení elektrických přístrojů sloužících k údržbě elektrických zařízení, při plánovaných beznapěťových stavech na elektrických stanicích. Zdroj byl vybrán pro srovnání naměřených charakteristik s polovodičovými zdroji. Schéma zapojení generátoru viz. *příloha 2*.



Obr. 19: Benzínová mobilní elektrocentrála italské firmy Pramac ES5000
Zdroj: <http://www.pramac.com>

Posledním, spíše doplňujícím měřeným zdrojem byl jednofázový zdroj nepřerušitelného napájení (UPS) nesinusového průběhu pro domácnosti a kanceláře od výrobce APC, typ ES700 (*obr. 20*) o výkonu 700 VA s vlastní baterií. Tento zdroj byl měřen také pro srovnání s ostatními zdroji.



Obr. 20: Zdroj nepřerušitelného napájení (UPS) pro domácnost a kanceláře APC ES700
Zdroj: <http://www.apc.com>

3.4 Měření charakteristik zdrojů s činným zatížením

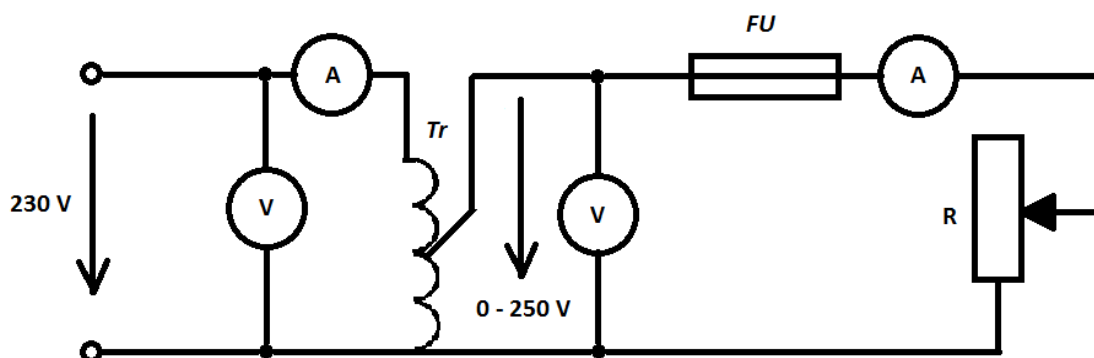
Nejčastěji se s činnou zátěží setkáváme v podobě tepelné zátěže. Jsou to například různá přímotopná tělesa, klasické žárovky s odporovým vláknem, rychlovarné konvice atp. Tyto zátěže však bývají také implementovány do složitějších elektrických zařízení, kde pak ovšem tvoří dominantní část výkonu zařízení. Jsou to například přímotopné ventilátory, pračky, sušičky, fény nebo horkovzdušné pistole.

V silnoproudých laboratořích jsou činné zátěže nejčastěji tvořeny výkonovými odpory a lineárními reostaty. Reostaty jsou jednoduché, dočasně přetížitelné a také mají možnost použití jak ve stejnosměrných, tak zároveň ve střídavých obvodech. Mají však nevýhodu malého regulačního rozsahu, kdy je dolní mez zátěžného výkonu dána maximálním odporem reostatu a horní mez pak hlavně maximálním proudovým zatížením odporového drátu a jezdcem použitého reostatu.

U reostatu $500\ \Omega$ s maximálním zátěžným proudem $1\ \text{A}$, se kterým se bude zatěžovat síť s napětím $230\ \text{V}$, se může odebíraný výkon regulovat pouze v rozsahu od $105,8\ \text{W}$ (při $R=\text{max.}$) do $230\ \text{W}$. Pokud se krátkodobě tento reostat dvojnásobně přetíží, poté se dosáhne výkonu $460\ \text{W}$. V tomto rozsahu se tedy dosáhlo regulace pouze od $23\ \%$ do $100\ \%$ maximálního výkonu, což je jeden necelý číselný řád. Laboratorně se může tento nedostatek řešit paralelním připojením dalších reostatů s nižším odporem nebo sériovým spojením reostatů se zkratovaným reostatem s nejvyšším odporem. Nejlepším řešením by byl výkonový reostat s logaritmicky rozloženým odporem, ty se však vyrábí jen velmi malých výkonů, přednostně pro využití v elektronických obvodech. [10,12]

3.4.1 Návrh činné zátěže

Nedostatky výše popisovaných regulovatelných činných zátěží může z velké části řešit zapojení výkonového reostatu, případně odporu do sekundárního obvodu autotransformátoru. Tento transformátor je doplněn pojistkou FU, která zabraňuje přetížení autotransformátoru. Činný výkon odporu roste s druhou mocninou napětí. Z pohledu napěťové závislosti se tedy jedná o zátěž s konstantní impedancí. Výhodou navrženého zapojení je plynulý a velký regulační rozsah výkonu zátěže. Navržený obvod pro měření charakteristik zdrojů s odporovou zátěží je na *obr. 21*.



Obr. 21: Obvod pro připojení navržené odporové zátěže

Postup měření:

Po orientačním výpočtu ohmické zátěže (reostat) dle maximálního výkonu zdroje (kapitola 3.2), se regulací autotransformátorem pomalu zvyšoval proud až na maximální jmenovitý výkon zdroje. Proud bylo možné kontinuálně odečítat z monitoru měřicího přístroje.

Všechny polovodičové zdroje byly při měření zatěžovány při provozu z baterií. Elektrocentrála byla měřena po 15minutovém zahřátí. Měření probíhalo s automatickým periodickým záznamem dat efektivních hodnot napětí, proudu a výkonů v intervalu 200 ms, ve smyslu pseudo-statických charakteristik. Proud se vždy měřil použitím klasických proudových kleští 10 A s železným jádrem. Pro záznam rychlých přechodových dějů se využíval záznam v režimu tranzientního zapisovače (transient recorder) se vzorkovací frekvencí 9600 vzorků za vteřinu. Pro následnou předběžnou analýzu, částečné zpracování a export naměřených dat byl použit program BK-Report, dodávaný k síťovému analyzátoru. Konečné zpracování, tvorba charakteristik a grafů pak proběhla v programu Excel 2013, který je součástí sady kancelářských programů Microsoft Office.

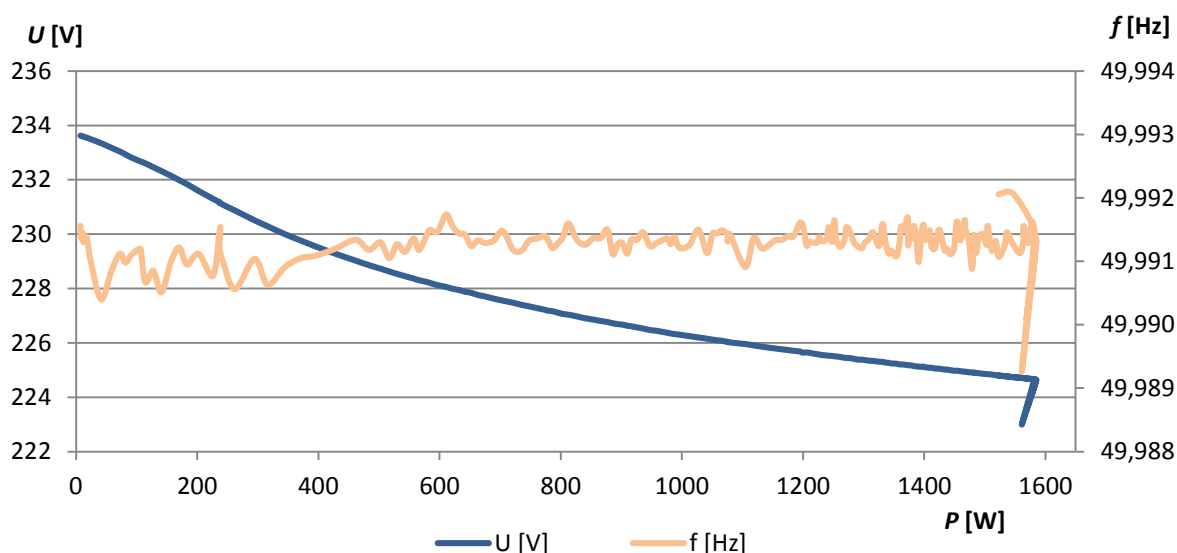
Realizované připojení síťového analyzátoru BK-Elcom ENA500 s laboratorním autotransformátorem ESS106 a reostatem připojeným ke zdroji Benning Tebevert vidíme na obr. 22.



Obr. 22: Připojení síťového analyzátoru BK-Elcom ENA500 ke zdroji Benning Tebevert

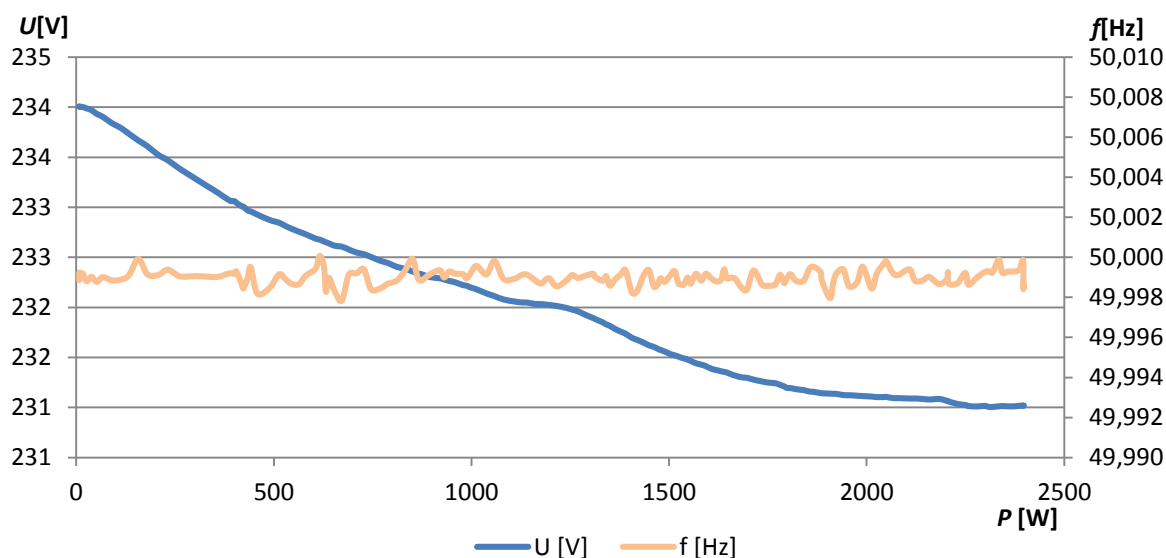
3.4.2 Charakteristiky zdrojů s činnou zátěží

Při měření na zdroji Elteco PS30T7 (UPS), kde výrobce udává maximální proud do činné zátěže 7,4 A, dle dostupných informací s možností trvalého přetížení o 10 % (8,14 A). Z charakteristiky zatížení (obr. 23) je zřetelné proudové omezení už při zatížení výkonem 1587 W, což je při poklesu napájecího napětí z původních 234 V na 225 V proud 7,05 A. Naměřené hodnoty maximálního výkonu tedy neodpovídají přesně údajům od výrobce. U frekvenční závislosti na činném výkonu díky konstrukci napěťového střídače s vlastní komutací (viz. kapitola 2.4.1), není prakticky žádná změna, ani při největším jmenovitém zatížení. Pouze při proudovém omezení je vidět výraznější pokles, ale stále se jedná o tisíce Hz.



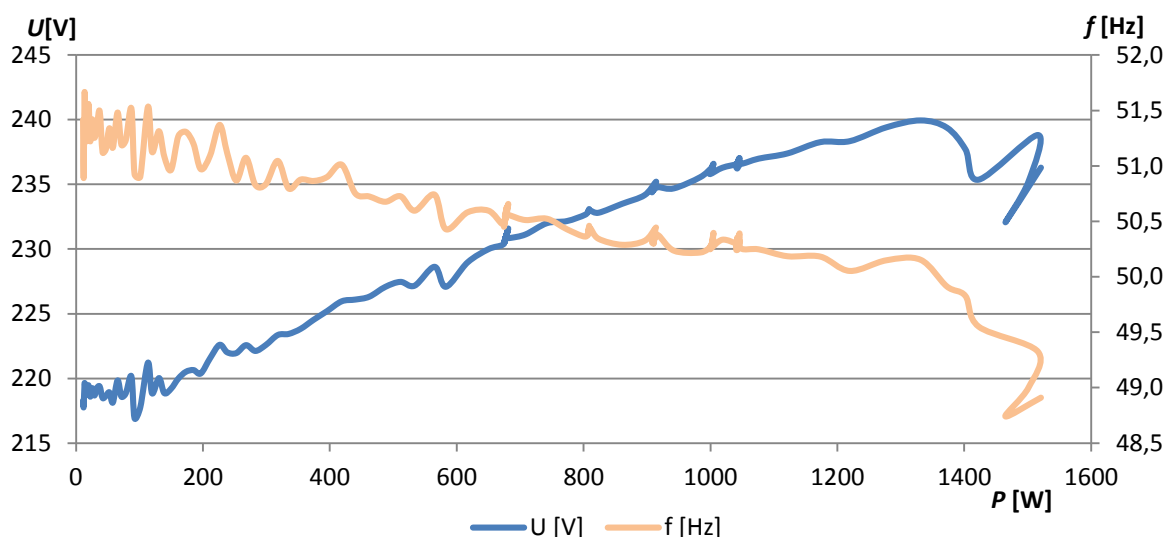
Obr. 23: Charakteristiky zdroje (UPS) Elteco 30T7 s odporovou zátěží

Střídač Benning Tebevert G110 se oproti předchozímu zdroji při činném zatížení choval jako napěťově tvrdší zdroj, což ukazuje zatěžovací charakteristika na obr. 24. Je patrný pokles výstupního napětí při téměř jmenovitém zatížení činným výkonem pouze o 3 V z původní hodnoty 234 V výstupního napětí. Zátěž na frekvenci zdroje díky jeho polovodičové konstrukci, stejně jako u předchozího zdroje, neměla vliv.



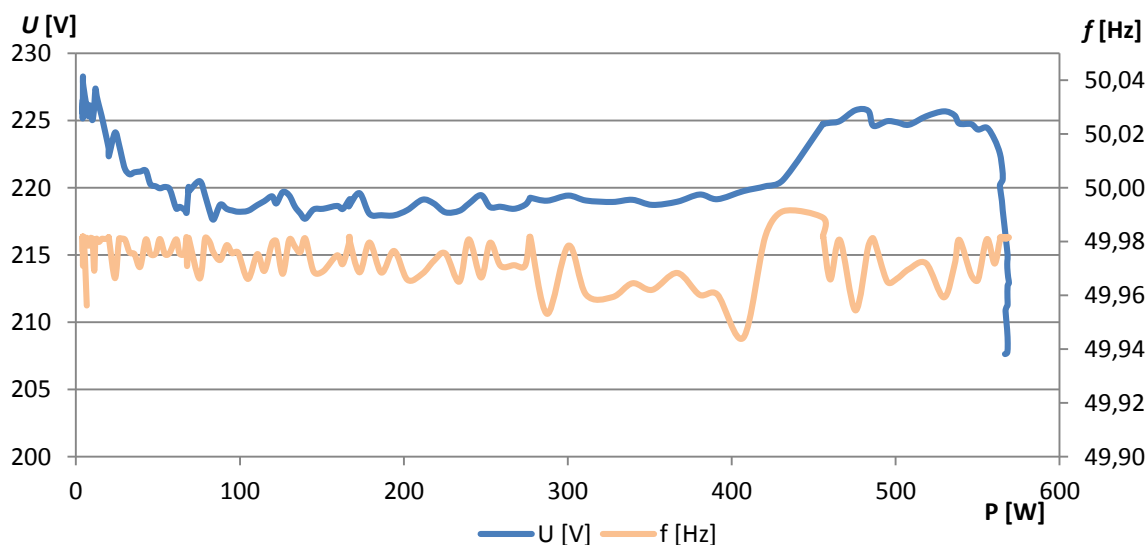
Obr. 24: Charakteristiky střídače Benning Tebevert s odporovou zátěží

Z charakteristiky zatížení elektrocentrály PRAMAC ES5000 (obr. 25), je trochu neočekávaně oproti předchozím zdrojům pozorovatelné vzrůstající napětí se zvyšujícím se činným zatížením. Dělo se tak pravděpodobně díky zpětné vazbě řídicího modulu. Z původních 220 V naprázdno napětí vzrostlo na 240 V. Naměřený maximální jednofázový činný výkon odpovídá výstupnímu třífázovému jmenovitému činnému výkonu 4,3 kW, který uvádí výrobce. Vzhledem ke konstrukci tohoto soustrojí, měla křivka frekvence předpokládaný pokles z 51,5 Hz bez zátěže na 49,5 Hz při jmenovitém zatížení. Tato elektrocentrála však pravděpodobně neměla správně seřízenou palivovou směs, protože částečně kolísaly otáčky se vzrůstajícím zatížením, což je možno pozorovat také z nepravidelnosti charakteristik. I když bylo toto měření provedeno třífázově, je uveden záznam jen jedné fáze, jelikož charakteristiky zbývajících dvou fází jsou prakticky totožné.



Obr. 25: Charakteristiky elektrocentrály Pramac ES5000 s odporovou zátěží - 1 fáze

U zdroje APC ES700 s nejmenším výkonem z měřených zdrojů, výrobce udává maximální jmenovitý činný výkon 405 W. Proudové omezení působilo až při hodnotě 555 W, což je o 150 W více (obr. 26). Napětí kolísalo mezi 228 V bez zátěže do 218 V při zatížení a kmitočet se pohyboval v rozmezí 5 setin Hz (opět polovodičový zdroj).



Obr. 26: Charakteristiky zdroje (UPS) APC ES700 s odporovou zátěží

3.5 Měření charakteristik zdrojů s jalovým zatížením

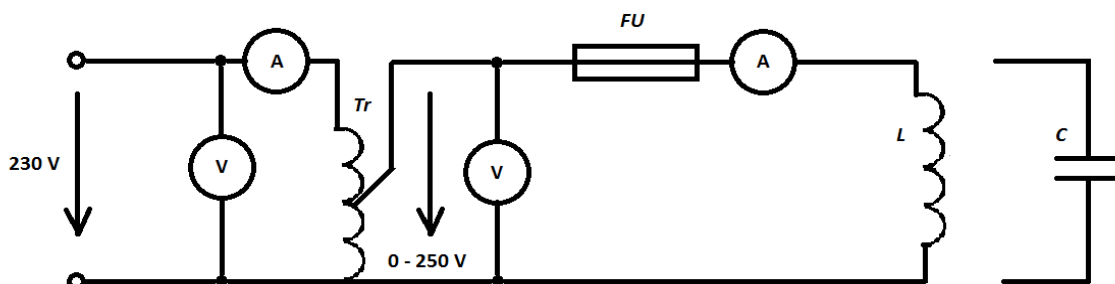
Induktivní jalovou zátěž lze realizovat například laboratorní tlumivkou, která může být realizována jako tlumivka s proměnlivou indukčností pohyblivým jádrem, tlumivkou s více odbočkami nebo tlumivkou s tyristorovou regulací. Tyristorová regulace se jeví jako ideální způsob plynulého řízení, velkou nevýhodou však je nutnost použití dalších obvodů pro snížení vznikajících vyšších harmonických.

Pro kapacitní jalovou zátěž je třeba využít kondenzátorů, které bohužel jako zdroj jalové energie nelze plynule regulovat. Regulace kapacitního jalového výkonu je v tomto případě možná jen připojováním jednotlivých kapacit. Fázové řízení, které je využito u tyristorově řízené tlumivky, způsobuje u kondenzátorů příliš velké proudové rázy a následné zahřívání kondenzátorů včetně spínacích tyristorů. [10]

3.5.1 Návrh induktivní a kapacitní jalové zátěže

Z výše uvedených problémů, které vyplývají z nevýhod připojování induktorů a kapacitorů, bylo pro jejich připojení použito obdobně jako v případě činné zátěže regulovatelného autotransformátoru (obr. 27). Opět se z pohledu napětíové závislosti jedná o zátěž s konstantní impedancí, na které při regulaci autotransformátoru výkon roste s druhou mocninou napětí.

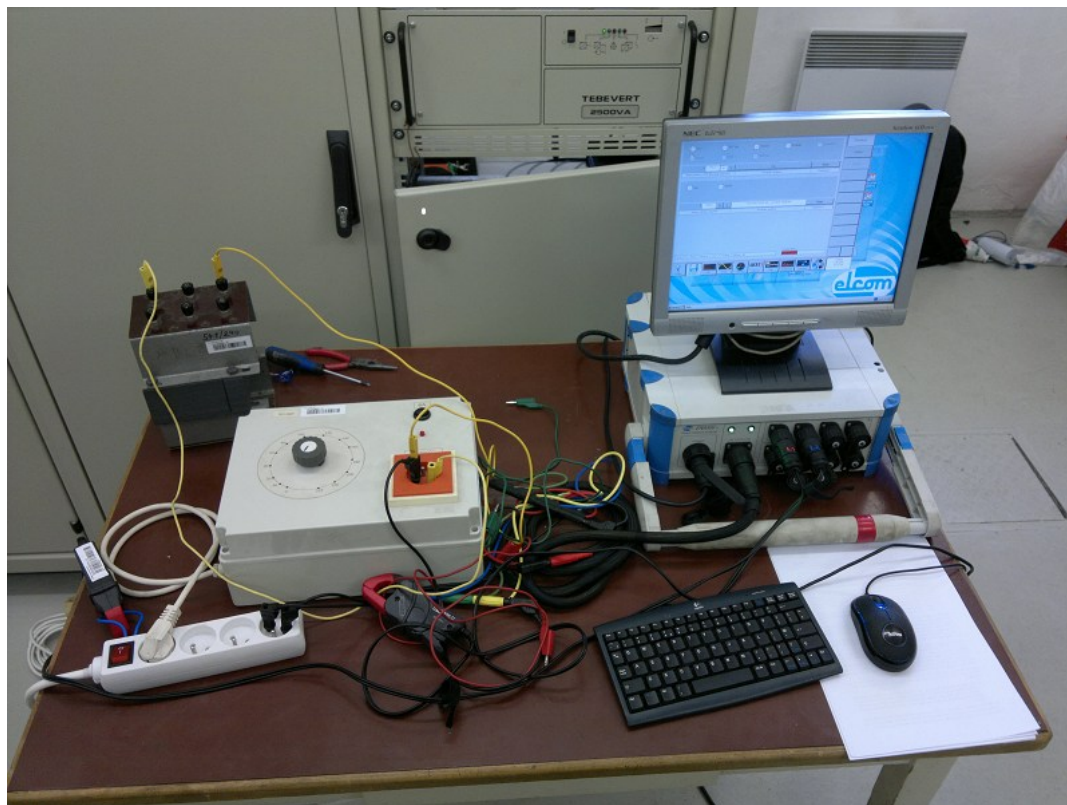
Pro induktivní zatížení byla využita laboratorní tlumivka spětí odbočkami. Zatěžování probíhalo postupně na všech odbočkách tlumivky tak, aby se dosáhlo maximálně jmenovitého zatížení zdroje. Pro kapacitní zátěž byl na výstup z autotransformátoru připojen kompenzační kondenzátor o velikosti $80\ \mu\text{F}$ (obr. 29). Maximální zatížení zde však bylo omezeno reaktancí kondenzátoru, která činí $39,8\ \Omega$ a výstupním napětím z autotransformátoru, viz rovnice (26).



Obr. 27: Obvod pro připojení navržené induktivní a kapacitní zátěže

Postup měření a záznam dat se opakoval, stejně jako v případě činného zatížení. Namísto reostatů byla použita výše zmíněná laboratorní tlumivka a kondenzátor. Zátěž tedy byla pouze jalová induktivní nebo jalová kapacitní.

Na obr. 28 můžeme vidět takto připojený síťový analyzátor BK-Elcom ENA500 s laboratorní tlumivkou ke zdroji Benning Tebevert



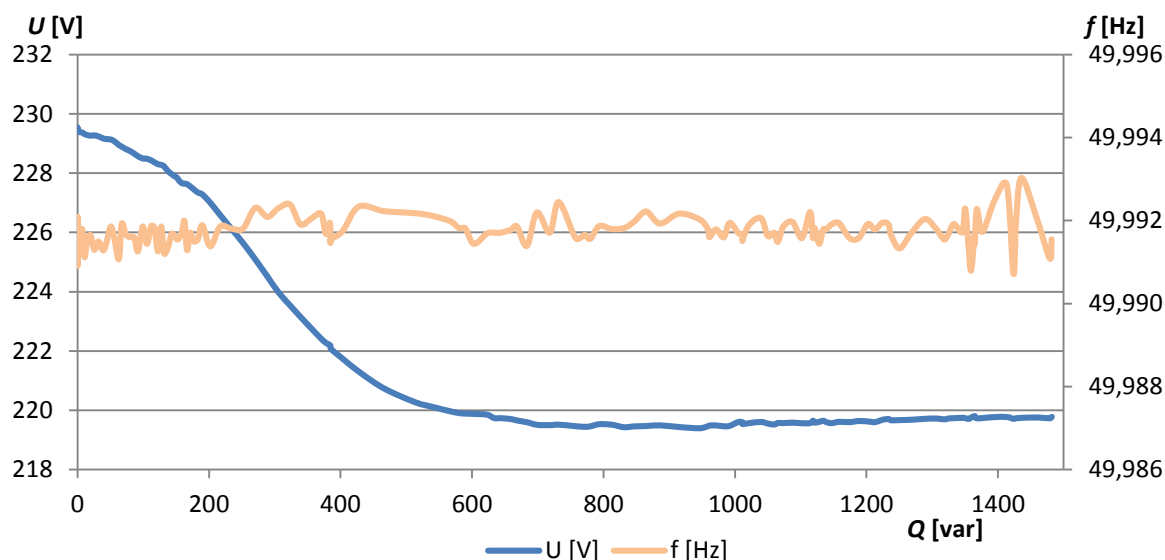
Obr. 28: Připojení síťového analyzátoru BK-Elcom ENA500 s tlumivkou ke zdroji Benning Tebevert



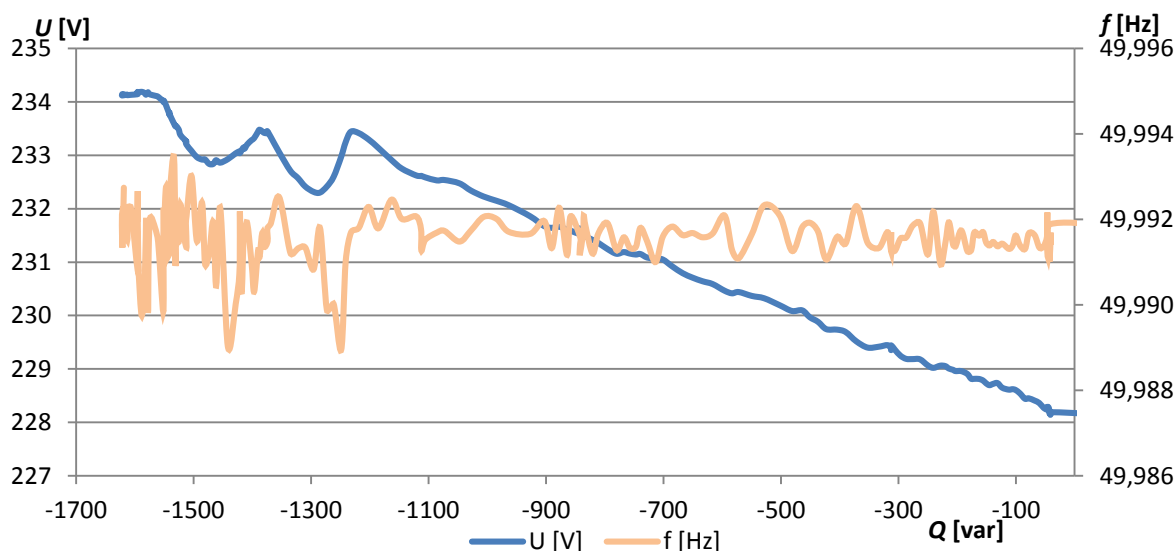
Obr. 29: Připojení kondenzátoru 80 μ F k autotransfórmátoru

3.5.2 Charakteristiky zdrojů s induktivní a kapacitní zátěží

Na charakteristice induktivního zatížení zdroje Elteco PS30T7 (obr. 30) vidíme pokles z napětí z 228,5 V bez zátěže na 218,5 V při 800 var, dále pak již napětí neklesalo. U kapacitního zatížení (obr. 31) tohoto zdroje z napětí bez zátěže vzrostlo o 6 V na 234 V. Lze však pozorovat při zatížení 1200 var nerovnosti křivky. Na frekvenci zdroje zatížení vliv prakticky nemělo, rozdíly jsou opět v tisících Hz.

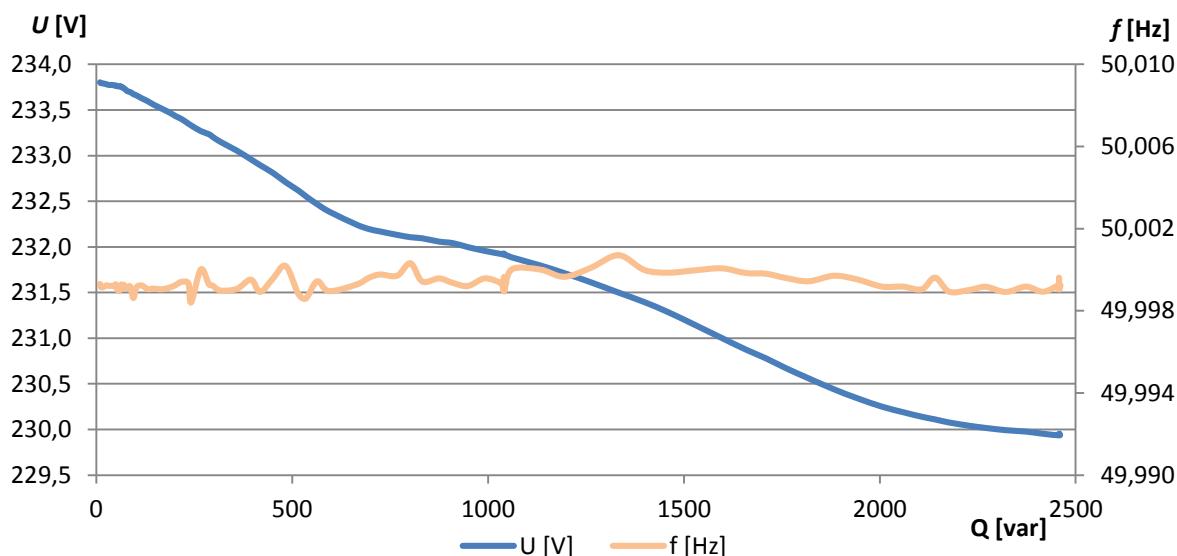


Obr. 30: Charakteristiky zdroje (UPS) Elteco 30T7 s induktivní zátěží

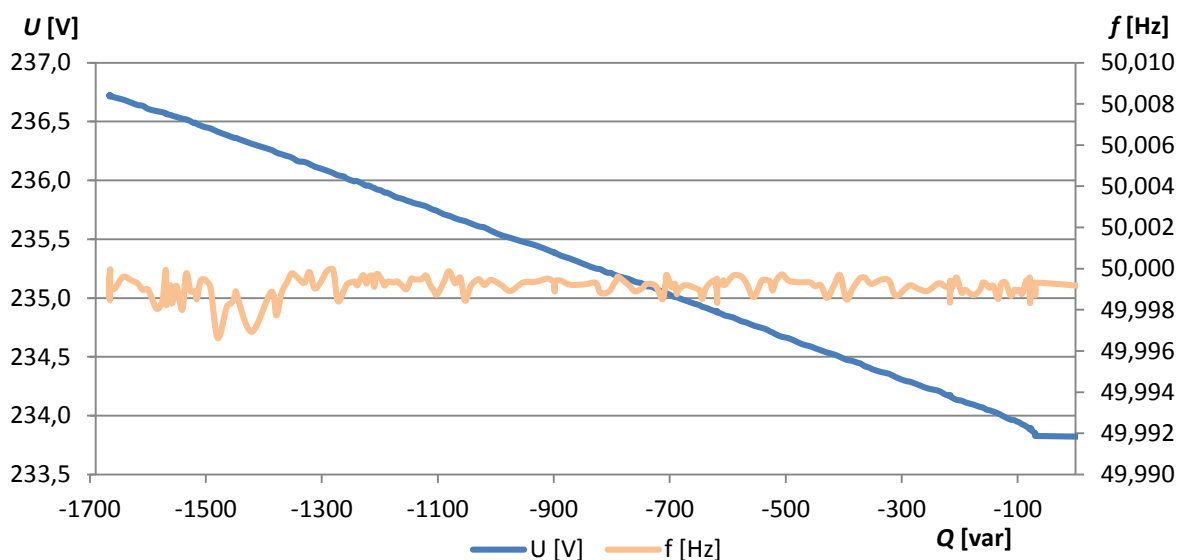


Obr. 31: Charakteristiky zdroje (UPS) Elteco 30T7 s kapacitní zátěží

Při induktivním zatížení (obr. 32) necelých 2500 var střídače Benning Tebevert je znatelný pokles z napětí bez zátěže 233,8 V o 4 V a naopak při kapacitním zatížení (obr. 33) 1700 var vzestup o 3 V. Změny frekvence opět prakticky bez vlivu na zatížení. Při srovnání s předchozím zdrojem UPS Elteco je vidět mnohem lepší linearizace křivek při tomto druhu zatížení.

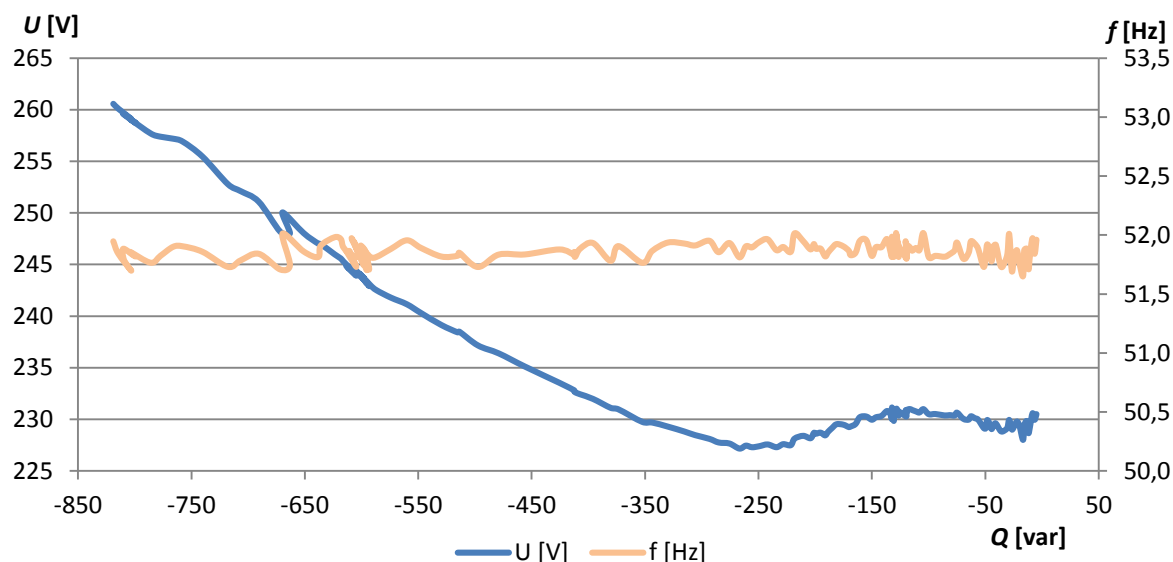


Obr. 32: Charakteristiky střídače Benning Tebevert s induktivní zátěží



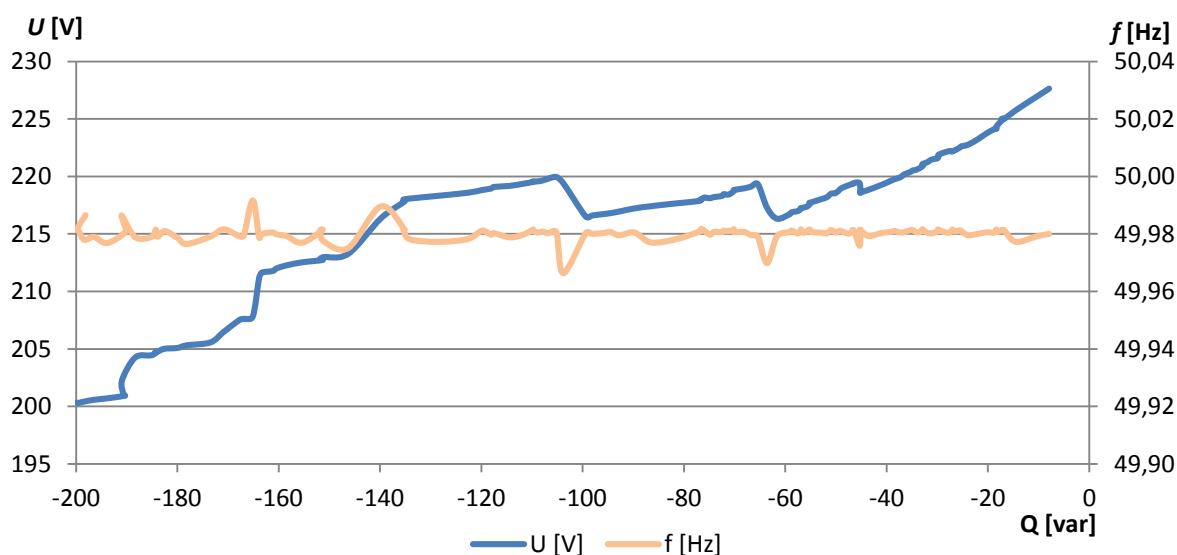
Obr. 33: Charakteristiky střídače Benning Tebevert s kapacitní zátěží

U elektrocentrály Pramac ES5000 (obdobně jako o zdroje APC ES700) v den jejího měření nebyla k dispozici laboratorní tlumivka. Proto její charakteristika induktivního zatížení bohužel chybí. Při zatěžování stroje kapacitní zátěží, bylo postupováno s ohledem na teorii o samobuzení synchronních samostatně pracujících kapacitně zatížených generátorů, popsanou v kapitole 2.6. Na charakteristice kapacitního zatížení (*obr. 34*) je možno vidět, že už při hodnotě 800 var se výrazně zvedlo napětí nad 260 V, proto se z obav o poškození izolačního systému stroje zatížení již dále nezvyšovalo. Je zjevné, že na tento druh zatížení elektrocentrála není konstruována. Frekvenční charakteristika se pravděpodobně i díky menšímu zatížení pohybovala v rozmezí do 0,5 Hz, neměla však ani klesající, ani stoupající charakter.



Obr. 34: Charakteristiky elektrocentrály Pramac ES5000 s kapacitní zátěží - 1. fáze

Na malém zdroji nepřerušitelného napájení (UPS) APC ES700 měla křivka napětí (*obr. 35*) v porovnání s ostatními zdroji klesající charakter. Také byl při kapacitním zatížení znát největší pokles efektivní hodnoty napětí už při zatížení 200 var na 200 V, proto se s dalším zatěžováním dále nepokračovalo. Křivka frekvence je opět spíše jen pro doplnění, protože stejně jako u předchozích polovodičových zdrojů má jen malý rozptyl, bez klesající nebo stoupající tendence. Charakteristika induktivního zatížení také bohužel není uvedena, jelikož v den měření nebyla k dispozici tlumivka (jako u zdroje PRAMAC ES5000).

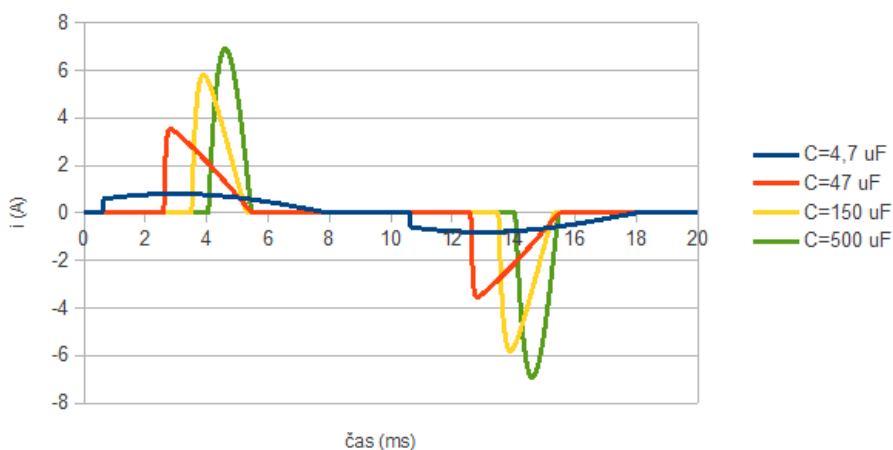


Obr. 35: Charakteristiky zdroje (UPS) APC ES700 s kapacitní zátěží

3.6 Měření charakteristik zdrojů s nelineárním zatížením

Mezi nelineární obvody řadíme všechny obvody, ve kterých dochází k usměrnění, modulaci, násobení kmitočtu atd. Prakticky se vyskytují v mnoha variantách a složitostech. Může to být obyčejná usměrňovací dioda nebo obvod se stovkami tranzistorů, operačních zesilovačů a podobně. Nelineární obvody však můžeme rozdělit na dvě základní skupiny. Do první patří obvody, jejichž nelinearitu způsobují parazitní vlastnosti daného zapojení. Tyto jevy mohou způsobovat parazitní kapacity, vodivosti a indukčnosti vznikající při integraci polovodičových prvků, nevhodným návrhem provedení konstrukce zapojení a dalšími způsoby. U všech těchto jevů je ale snaha je potlačit nebo co nejvíce omezit. Druhou skupinou jsou pak obvody, se záměrně vytvořenou nelinearitou. Jedná se hlavně o polovodičové prvky, které jsou konstruovány tak, aby jejich charakteristiky obsahovaly určitou nelinearitu. Můžou být vytvořeny pro speciální účel, například tyristor, triak nebo mají jiné všestranné použití. Můžou to pak být integrované obvody s velmi složitou vnitřní strukturou, skládající se z velkého počtu nelineárních prvků, jako jsou tranzistory, diody a další. Mezi tato nelineární zařízení se také řadí dnes stále častěji se vyskytující spínané zdroje, které se často vyskytují v zařízeních vyžadující malé napětí s velkým proudem.

Typickou zátěží, představující nelineární zátěž, jsou spotřebiče s polovodičovým usměrňovačem. Jsou to například zdroje napájející spotřební elektroniku. Tyto zdroje se převážně skládají z dvoucestného můstkového usměrňovače (Greatzův můstek), který pracuje do vyhlazovacích kondenzátorů, jenž pak napájí samotný spotřebič. Zapojení s tímto obvodem se vyznačuje odběrem proudu v okolí maxima napětí, kde se nabíjí vyhlazovací kondenzátor ve stejnosměrném obvodu spotřebiče. Šířka proudového pulzu se pak odvíjí od velikosti odebíraného výkonu z usměrňovače a velikosti vyhlazovacích kondenzátorů. Náznorný příklad průchodu proudu kondenzátorem pak můžeme vidět na provedené simulaci v programu QUCS pro napájecí napětí 230 V, 50 Hz a zatěžovací odpor na stejnosměrném výstupu 500 W s délkou simulace 20 ms, tedy jednu periodu (obr. 36). [10]



Obr. 36: Simulace průchodu proudu kondenzátorem v program QUCS [10]

3.6.1 Návrh nelineární zátěže

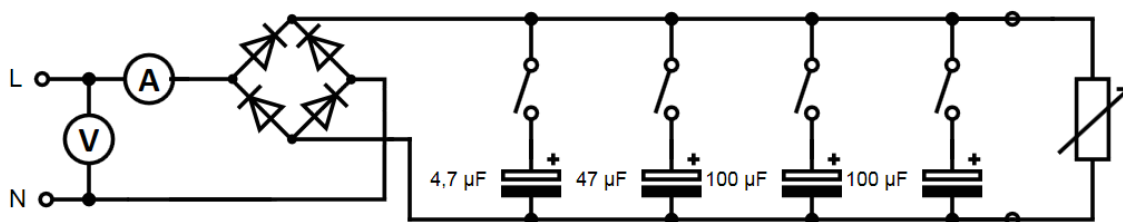
Pro účely simulace výše uvedené nelineární zátěže byl sestrojen laboratorní přípravek, který můžeme vidět na *obr. 37*.



Obr. 37: Laboratorní přípravek nahrazující nelineární zátěž

Přípravek se skládá z dvoucestného usměrňovače a spínačů, díky kterým lze připojit vyhlazovací kondenzátory o velikosti $4,7 \mu\text{F}$, $47 \mu\text{F}$ a dvakrát $100 \mu\text{F}$. Na výstup tohoto přípravku se připojila činná zátěž v podobě reostatu s patřičnou impedancí, kterým se plynule reguloval výkon. Měřicí obvod vidíme na *obr. 38*.

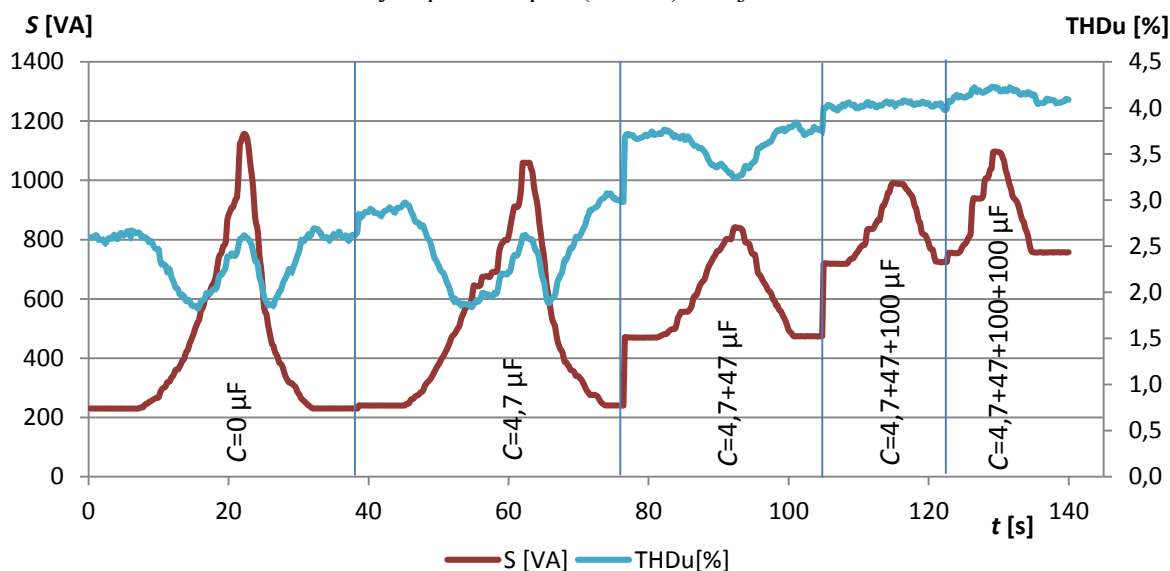
Záznam z následujícího měření byl pořízenou obdobnou metodou na síťovém analyzátoru BK Elcom, jako v předchozích měřeních. Díky vyhodnocení celkového harmonického zkreslení, který tento analyzátor umí pořádit, je možné v následujících charakteristikách posoudit vliv nelineárního přípravku a vyhlazovacích kondenzátorů na zdroje.



Obr. 38: Zapojení přípravku nahrazující nelineární zátěž

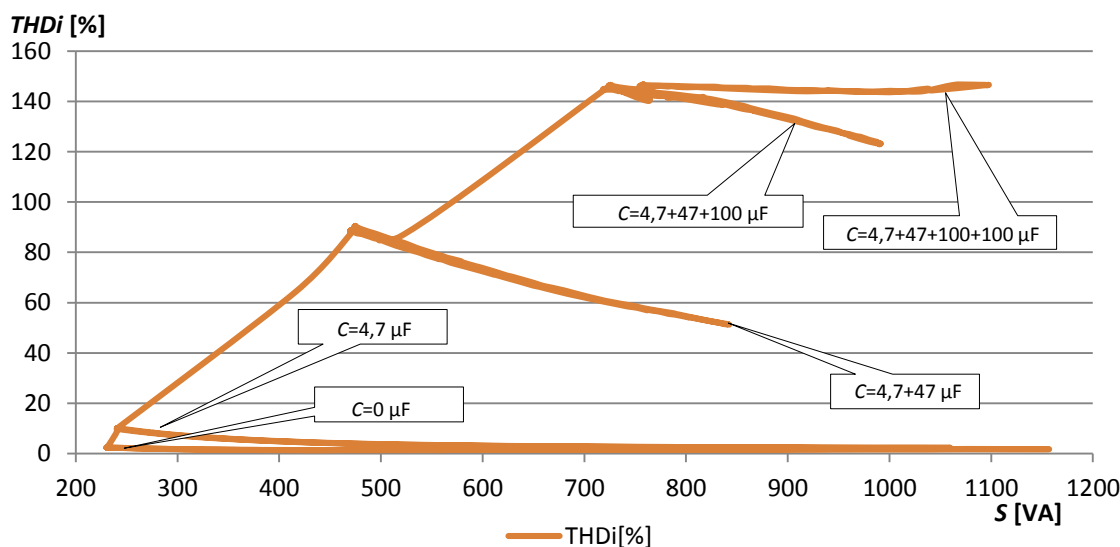
3.6.2 Charakteristiky zdrojů s nelineárním zatížením

Časový průběh, ze kterého je zřejmý postup měření na nelineární zátěži se zdrojem Elteco PS30T7 vidíme na *obr. 39*. Nejprve se připojil přípravek jen s usměrňovacím můstkem bez vyhlazovacích kondenzátorů. Poté se zvýšila a následně snížila reostatem zátěž a spínačem se připojil kondenzátor 4,7 μF . Opět následovala regulace výkonu na zátěži a připojil se další kondenzátor. Tento postup se opakoval až do maximálního počtu připojených kondenzátorů. Na pravé svislé je vyneseno celkové harmonické zkreslení výstupního napětí ($THDu$) zdroje.



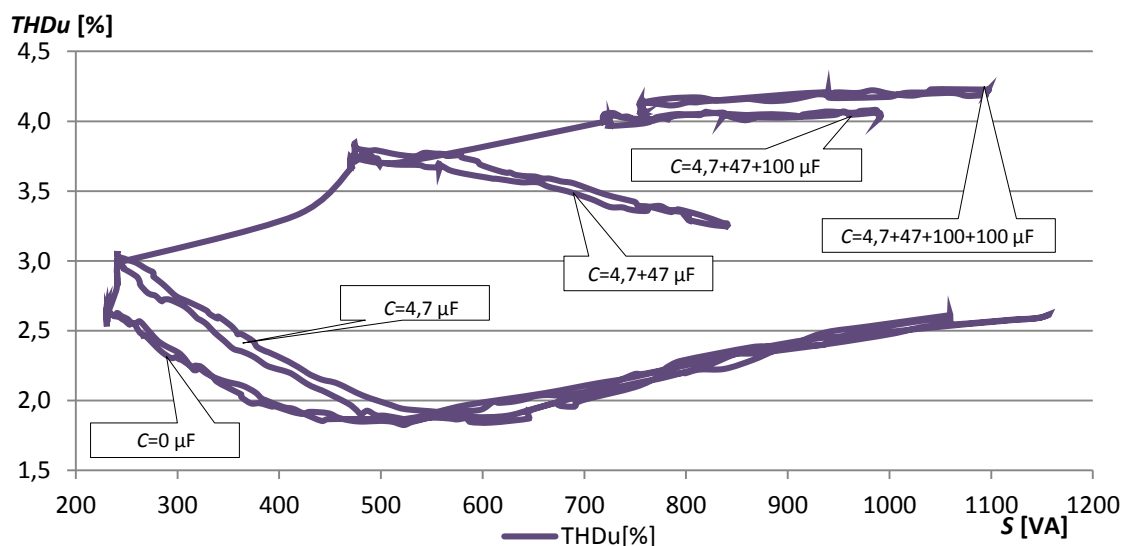
Obr. 39: Průběh zdánlivého výkonu a THDu v závislosti na čase zdroje Elteco PS30T7 s nelineární zátěží

Dále je pro ilustraci zobrazena převodní charakteristika průběhu celkového harmonického zkreslení proudu $THDi$ v závislosti na zdánlivém výkonu S (*obr. 40*). Zde je možné pozorovat, jak křivka (v horizontální rovině) s každým dalším připojeným vyhlazovacím kondenzátorem (levé propojení horizontálních křivek) nabývá na velikosti a pak když se zvýší proudové zatížení, tak mírně poklesne. Křivka ve spodní části grafu bez vyhlazovacího kondenzátoru ($C=0 \mu\text{F}$) se s křivkou s kondenzátorem 4,70 μF prakticky překrývá, protože tato hodnota byla příliš malá na to, aby se zásadněji projevila. Jelikož je podstatný vliv zátěže na zdroj, závislost $THDi$ u dalších zdrojů již není uvedena.



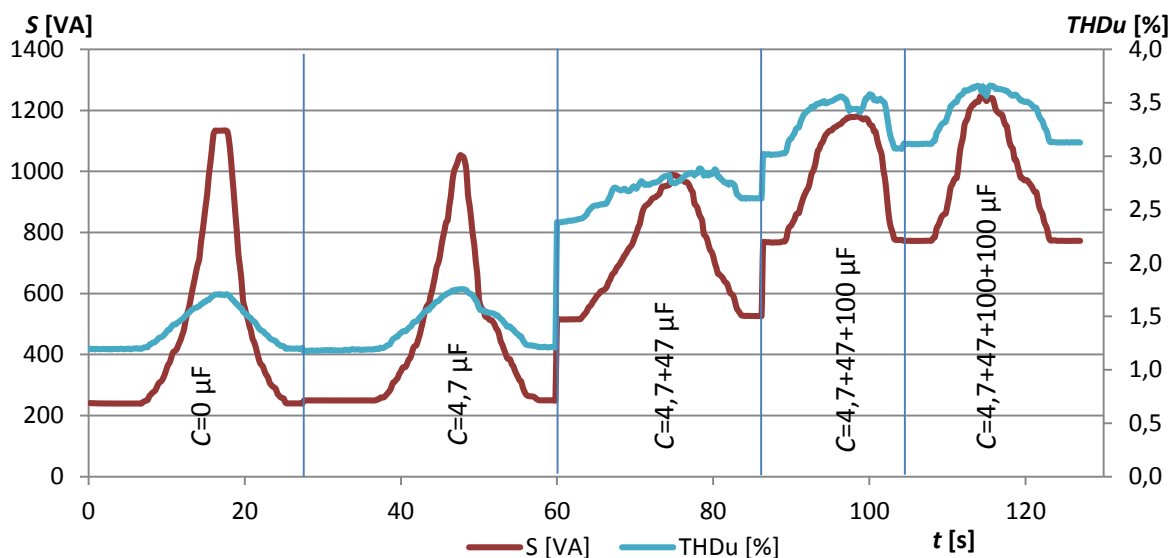
Obr. 40: Průběh THDi zdroje (UPS) Elteco 30T7 s nelineární zátěží

Obdobné zobrazení má taky celkové harmonické zkreslení napětí zdroje $THDu$, opět v závislosti na zdánlivém výkonu, které však nabývá proti $THDi$ zásadně menších hodnot (obr. 41). Na této závislosti můžeme vidět vliv nelineární zátěže na zdroj. Křivka je více zkreslená, ale vliv zvýšení kapacity vyhlazovacích kondenzátorů na $THDu$ je dostatečně čitelný. Zdvojení horizontálně směřovaných křivek značí regulaci výkonu na zátěži. Maximální hodnoty 4,3 % tedy dosáhla se všemi připojenými kondenzátory s celkovou kapacitou 252 μF při výkonu na zátěži přes 1100 VA.



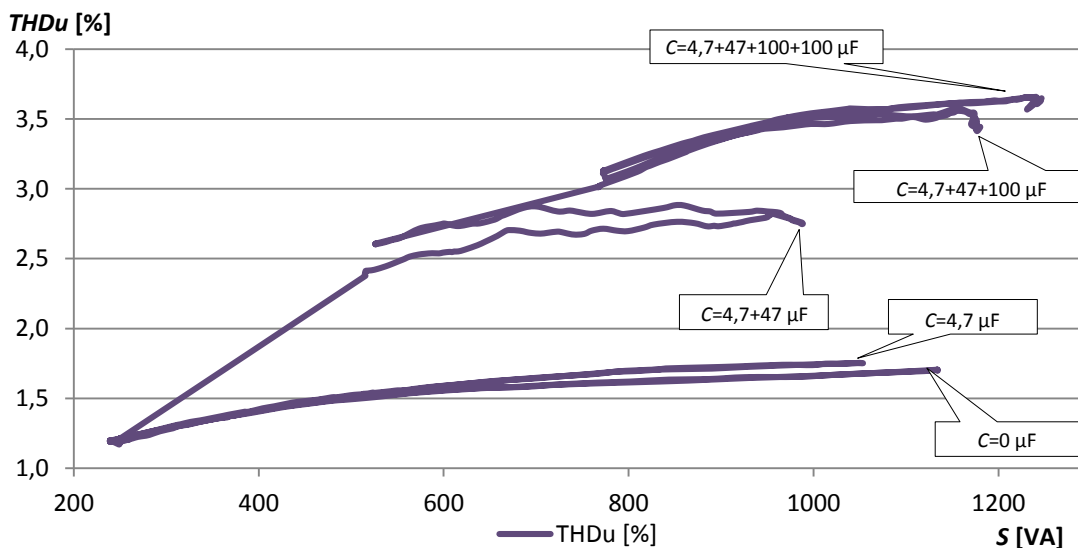
Obr. 41: Průběh $THDu$ zdroje (UPS) Elteco 30T7 s nelineární zátěží

V dalším časovém průběhu je zobrazen záznam měření na zdroji Benning Tebevert (obr. 42). Průběh měření byl stejný, jako u předchozího zdroje. Postupně se připojovaly vyhlazovací kondenzátory s následným zvýšením a snížením výkonu na zátěži. Můžeme pozorovat i obdobný vliv na $THDu$ s postupným zvýšením kapacity. V porovnání s předchozím zdrojem při srovnatelném výkonu na zátěži 1250 VA, dosahuje s nejvyšší hodnotou kapacity kondenzátorů 252 μF celkové zkreslení 3,7 %, což je o 0,6 % menší hodnota.



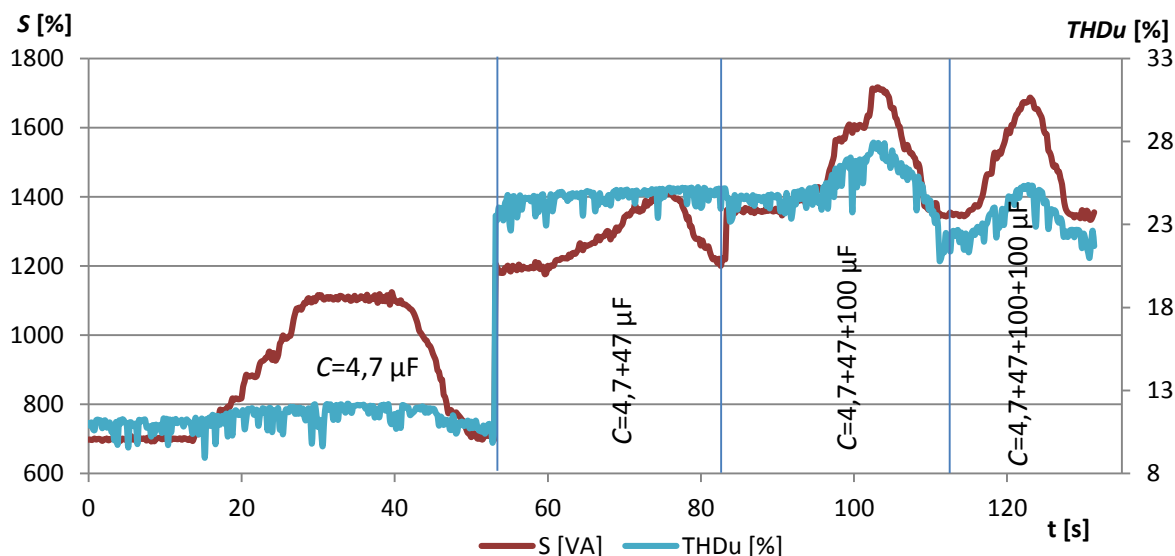
Obr. 42: Průběh zdánlivého výkonu a $THDu$ v závislosti na čase zdroje Benning Tebevert s nelineární zátěží

Následující závislost celkového harmonického zkreslení napětí na zdánlivém výkonu (obr. 43) je opět znázorněním měřených veličin z předchozího obrázku. Při opětovném srovnání s předchozím zdrojem je vliv kapacit obdobný, jen mají horizontální křivky vzestupnější charakter. Spodní dvě křivky znovu prakticky splývají a větší rozdíl už není ani mezi posledními dvěma hodnotami kapacit vyhlazovacích kondenzátorů.



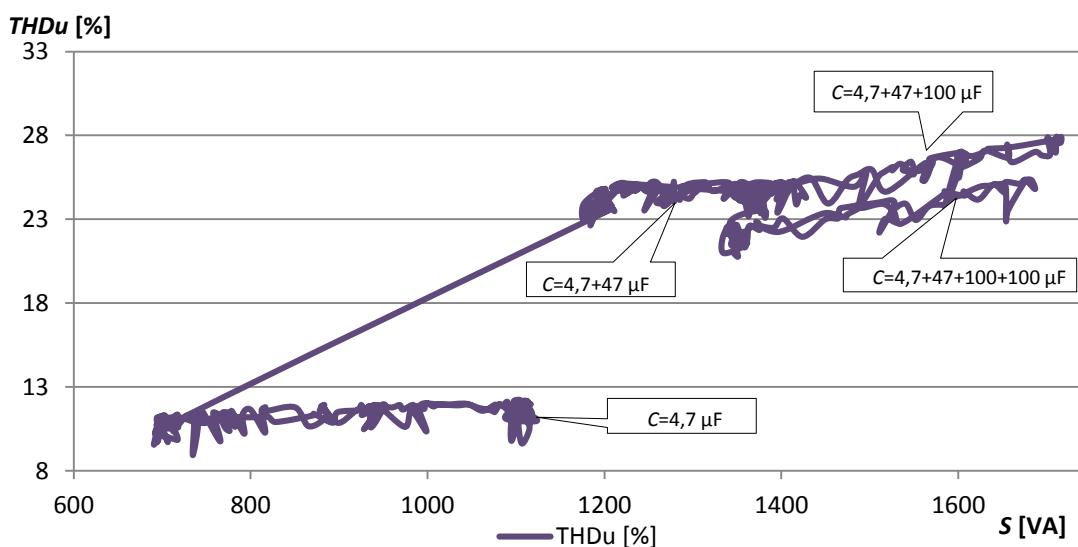
Obr. 43: Průběh $THDu$ zdroje Benning Tebevert s nelineární zátěží

Ve třetím zobrazení je průběh měření v čase elektrocentrály Pramac ES5000 (obr. 44). Postup měření se i do třetice opakoval, jen přípravek nebyl zatížen zcela bez kondenzátoru. Protože se na rozdíl od předchozích polovodičových zdrojů jedná o zdroj se synchronním generátorem, což je zdroj zcela odlišné konstrukce od předchozích zdrojů, nabývá celkové harmonické zkreslení $THDu$ naprosto odlišných hodnot. Rozdílný je i vliv kapacit kondenzátorů. Jedná se navíc o třífázový stroj, kde je reakční pole generátoru citlivé na třetí harmonickou, která se projeví jako nulová složka. Jelikož měření bylo realizováno jednofázově, bylo tedy částečně doprovázeno změnou efektivní hodnoty fázového napětí tohoto stroje, což vedlo i k výraznější změně zdánlivého výkonu připojením druhého kondenzátoru ($C = 4,7 + 47 \mu F$). $THDu$ se pohybuje od hodnoty přibližně 10 % až do hodnoty 28 % při zdánlivém výkonu na zátěži do 1700 VA. Lze tedy konstatovat, že je tento stroj mnohem citlivější na nelineární zátěž než předchozí dva testované zdroje.



Obr. 44: Průběh zdánlivého výkonu a $THDu$ v závislosti na čase zdroje Pramac ES5000 s nelineární zátěží v 1. fázi

Charakteristika na obr. 45 je špatně čitelná díky rozptýlení hodnot $THDu$ a výše zmíněných změn fázového napětí během měření, což vyplývá z konstrukce zdroje. Přesto je pro úplnost zobrazena a pro odvození hodnot z křivek platí stejné zásady jako z předchozích charakteristik.



Obr. 45: Průběh $THDu$ zdroje ES5000 s nelineární zátěží

Charakteristiky kancelářské UPS jednotky APC ES700 s nelineární zátěží nejsou zobrazeny, protože výstupní napětí tohoto zdroje má nesinusový průběh a zobrazení obdobných charakteristik nemá praktický význam.

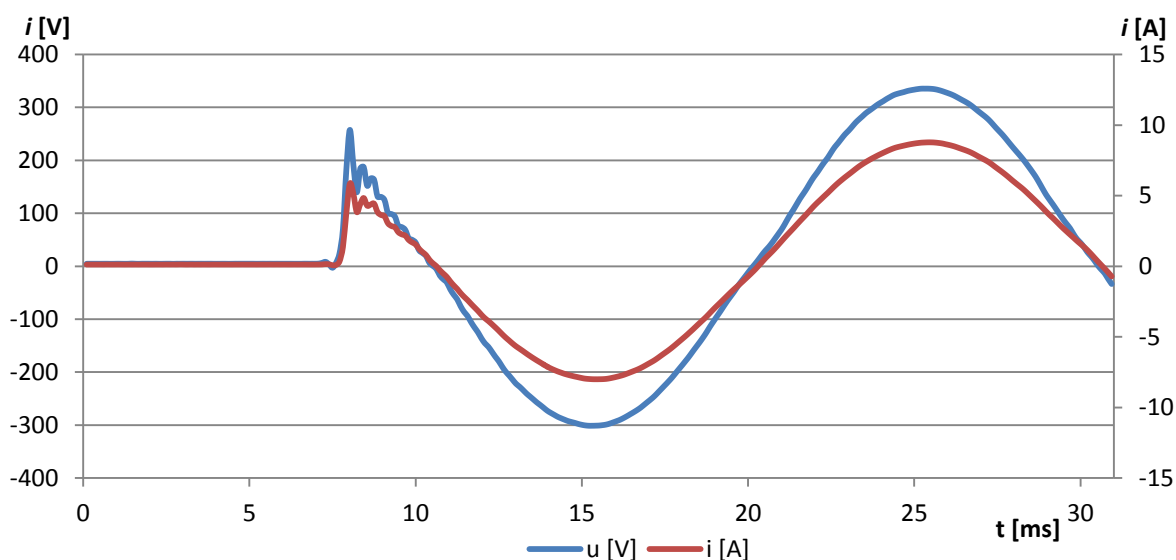
3.7 Transientní záznamy přechodných jevů

Přechodné děje, nazývány též jako přechodné jevy nebo dynamické děje, vznikají v soustavách, kde je zapojen alespoň jeden akumulací prvek. Takovým prvkem může být induktor nebo kapacitor. Zapřechodné děje pak označujeme změny mezi původním a ustáleným stavem.

Při testování zdrojů obsažených v této práci docházelo k přechodným dějům připojením a odpojením testovacích zátěží, na kterých se podílely i akumulací prvky výstupních obvodů jednotlivých zdrojů. K řešení obdobných přechodných dějů se zdrojem harmonického napětí využíváme diferenciálních matematických rovnic. Taková řešení však přesahují rámec zpracování této diplomové práce. Dále zobrazené průběhy napětí a proudu z transientního zapisovače použitého síťového analyzátoru přístroje BK-Elcom ENA550, které byly během měření zaznamenány, mají spíše informační charakter pro ucelení představy o vlivu jednotlivých zátěží na testované zdroje. Zobrazené průběhy byly snímány na zdrojích Elteco PS30T7 a Benning Tebevert.

Činná zátěž

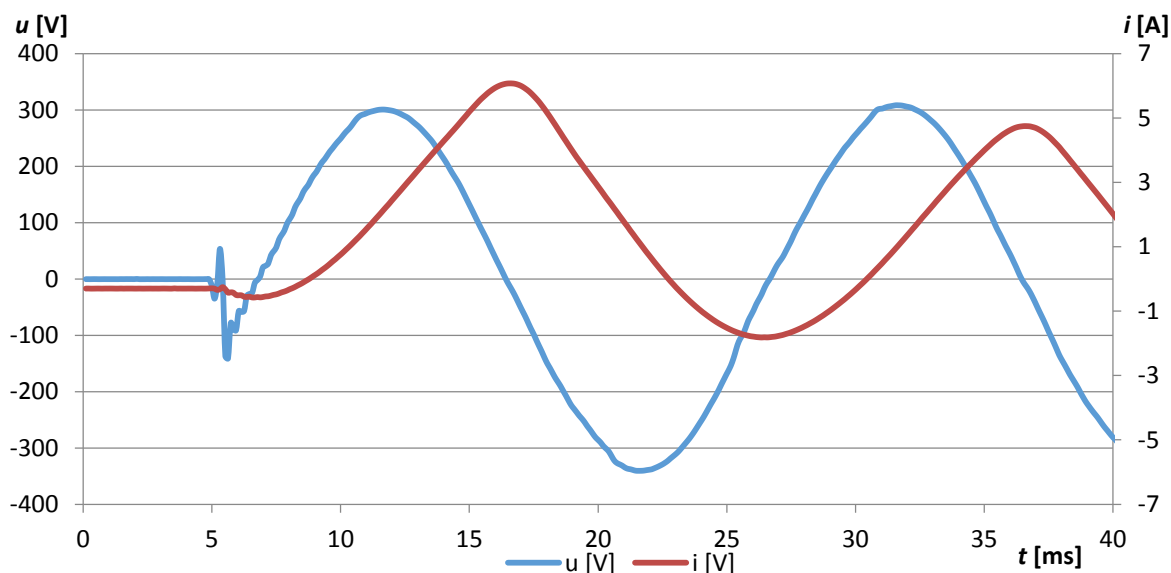
Průběh okamžitých hodnot výstupního napětí a proudu zdroje Elteco PS30T7 (*obr. 46*) ukazuje, že připojování a odpojování navržených odporových zátěží s autotransfornátorem ESS106 dle schématu na *obr. 21* není problémem. Viditelný je jen malý zákmit v okamžiku připnutí. Napětí a proud jsou ve fázi. Odpojení zátěže není zobrazeno.



Obr. 46: Transientní záznam připojení odporové zátěže ke zdroji Elteco PS30T7

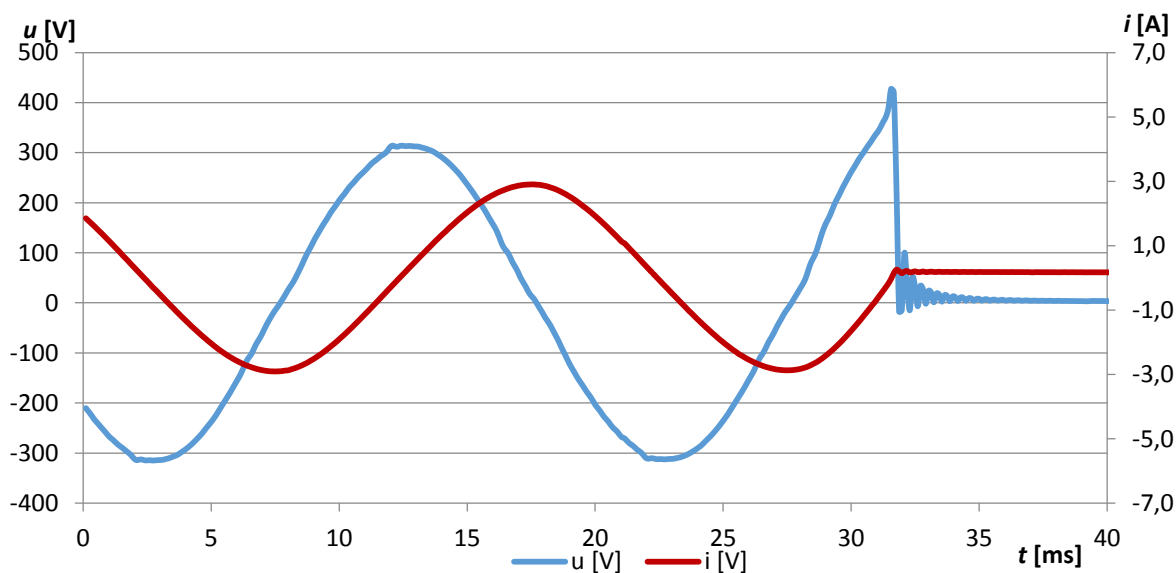
Induktivní zátěž

Na obr. 47 vidíme opět průběh okamžitých hodnot výstupního napětí a proudu zdroje Elteco PS30T7 s připojením indukční zátěže připojenou dle schématu na obr. 27. Zde je už znatelný podíl stejnosměrné složky proudu, který během dvanácti period odezněl. Proud je zpožděn o 90° , což značí čistě indukční zatížení.



Obr. 47: Transientní záznam připojení indukční zátěže ke zdroji Elteco PS30T7

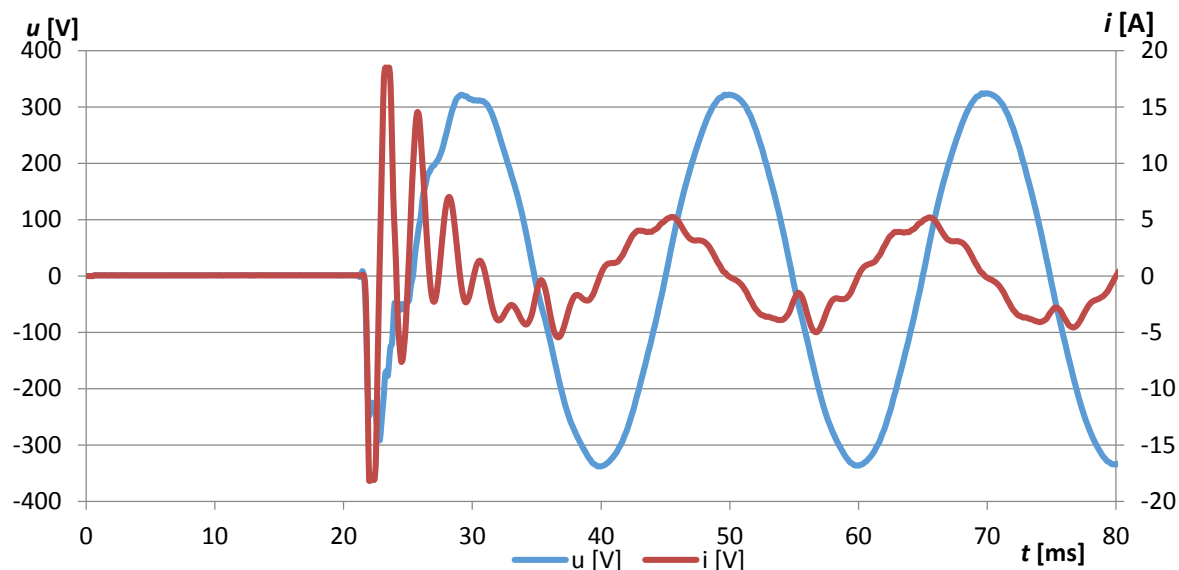
Odpojení indukční zátěže je doprovázeno napěťovou špičkou s okamžitou hodnotou napětí 430 V, díky akumulované energii z tlumivky, což je možné pozorovat na obr. 48 (také zdroj Elteco) obr. 47.



Obr. 48: Transientní záznam odpojení indukční zátěže na zdroji Elteco PS30T7

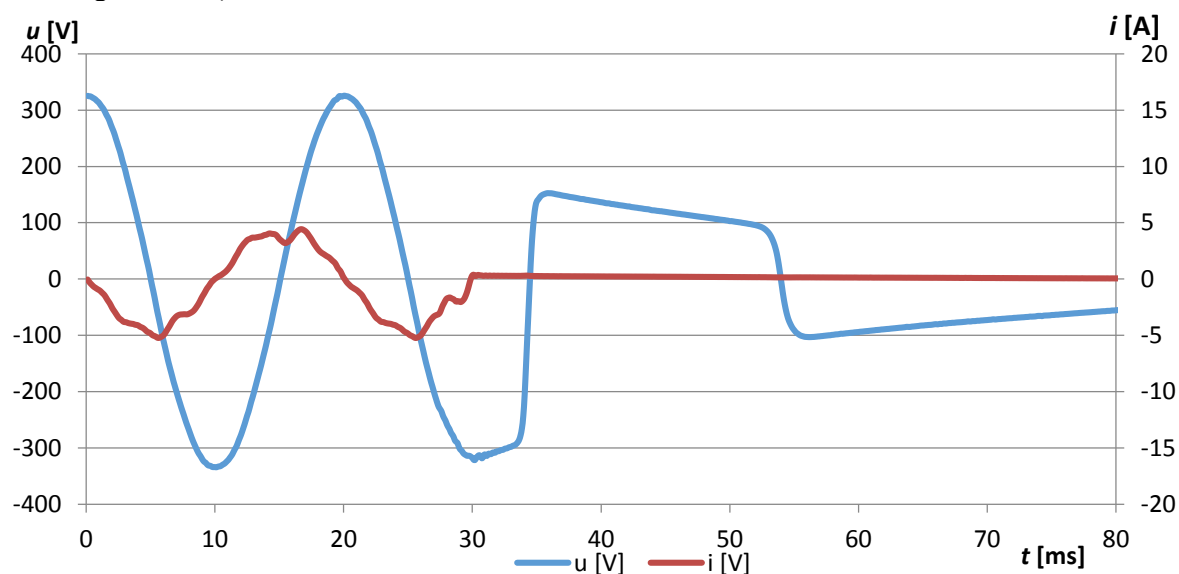
Kapacitní zátěž

Přechodný děj při připojení kapacitní zátěže dle schéma na obr. 27 je znázorněn na obr. 49. Zobrazen je průběh napětí a proudu na zdroji Benning Tebevert. Zde je vidět proudová špička nabíjení kondenzátoru s tlumenými kmity, jejíž okamžitá hodnota dokonce přesáhla 18 A, což bylo snímací maximum použitých proudových kleští měřicího přístroje BK-Elcom. Během jedné periody však došlo k ustálení. Napětí je zpožděno o 90° , což značí kapacitní charakter obvodu.



Obr. 49: Transientní záznam připojení kapacitní zátěže ke zdroji Benning Tebevert

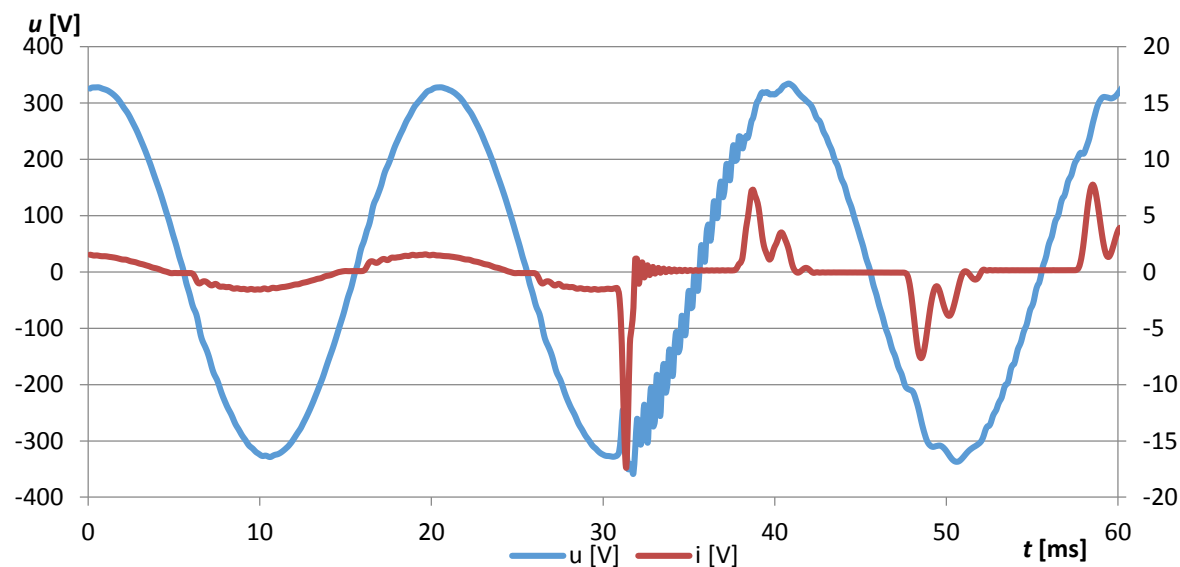
Odpojení kapacitní zátěže doprovázené tlumeným kmitem napětí je zobrazeno na obr. 50 (zdroj Benning Tebevert).



Obr. 50: Transientní záznam odpojení kapacitní zátěže na zdroji Benning Tebevert

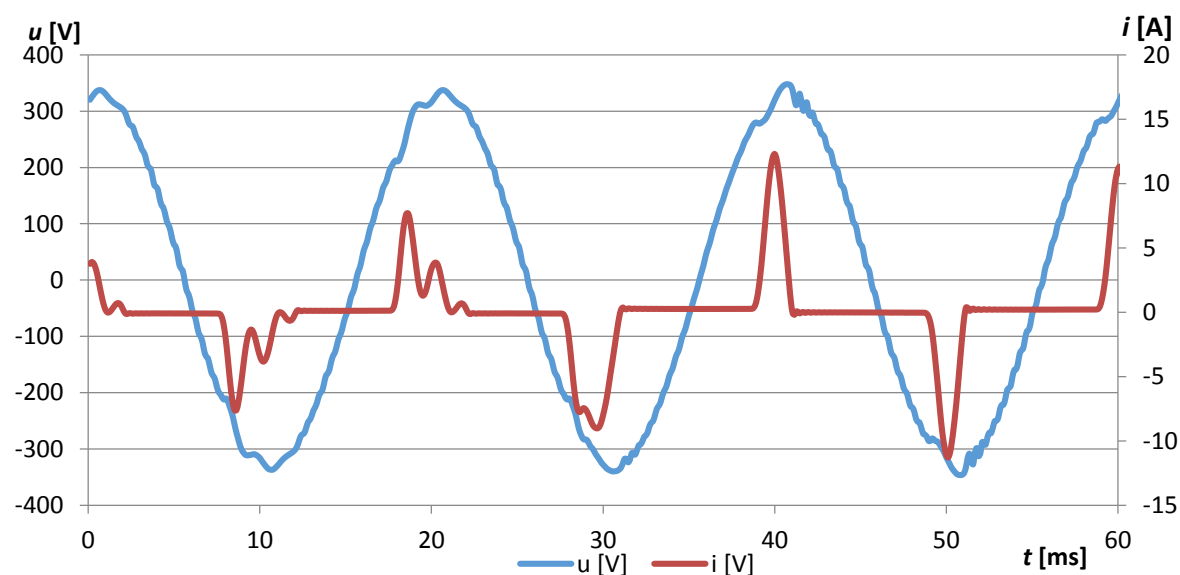
Nelineární zatížení

Průběh napětí a proudu na zdroji Elteco PS30T7 s nelineárním přípravkem v okamžiku připojení vyhlazovacího kondenzátoru je možno vidět na *obr. 51*. Zde je možno také pozorovat proudové pulzy (popsány v kapitole 3.6), které tyto kondenzátory za usměrňovačem odebírají. Tento přechodný děj byl zaznamenán připojením druhého kondenzátoru v řadě na přípravku ($47\ \mu\text{F}$).



Obr. 51: Transientní záznam připojení vyhlazovacího kondenzátoru $47\ \mu\text{F}$ na nelineární zátěži na zdroji Elteco PS30T7

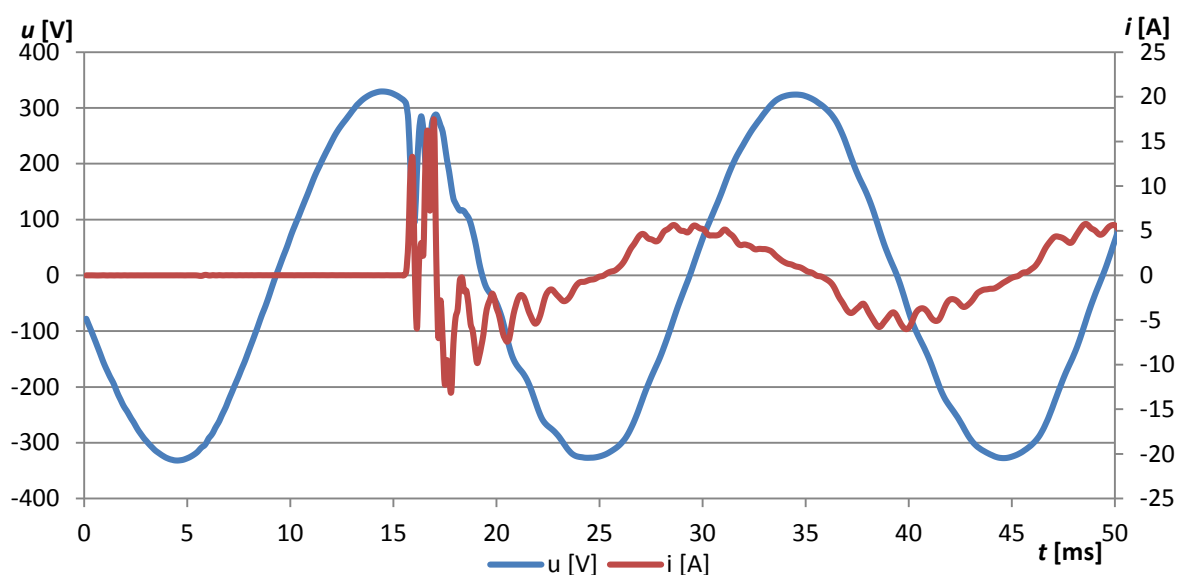
Připojení třetího kondenzátoru v řadě ($100\ \mu\text{F}$) vidíme na *obr. 52*. Je možné pozorovat další zvýšení proudových pulzů (zdroj Elteco PS30T7).



Obr. 52: Transientní záznam připojení vyhlazovacího kondenzátoru $100\ \mu\text{F}$ na nelineární zátěži na zdroji Elteco PS30T7

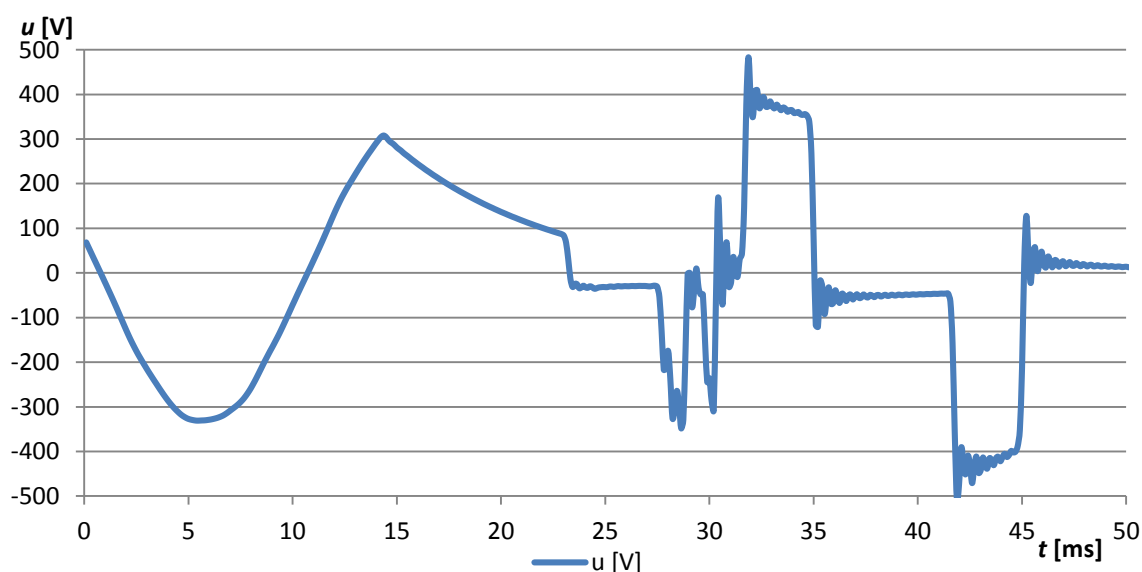
Obnovené napětí UPS

Jak již bylo vícekrát uvedeno, zdroj nepřerušného napájení (UPS) Elteco PS30T7 je připojen v zálohovaném rozvodu el. stanice, kde napájí v odděleném rozvodu zajištěného střídavého napětí požární ventilátory a nouzové osvětlení. Tato jednotka je připojena na rozvod v režimu Line-interactive (viz kapitola 2.5). Při měření tohoto zdroje s instalovanými spotřebiči přímo v rozvaděči zajištěného napájení, byl proveden transientní záznam při simulovaném výpadku napájení, kdy UPS jednotka obnovila dodávku el. proudu a začala napájet spotřebiče (obr. 53). Obnovení napětí proběhlo do 2 ms. Po obnovení síťového napájení, nebylo už napětí přerušeno (bez přechodového jevu - není zobrazeno).



Obr. 53: Transientní záznam obnoveného napájení zdroje (UPS) Elteco PS30T7

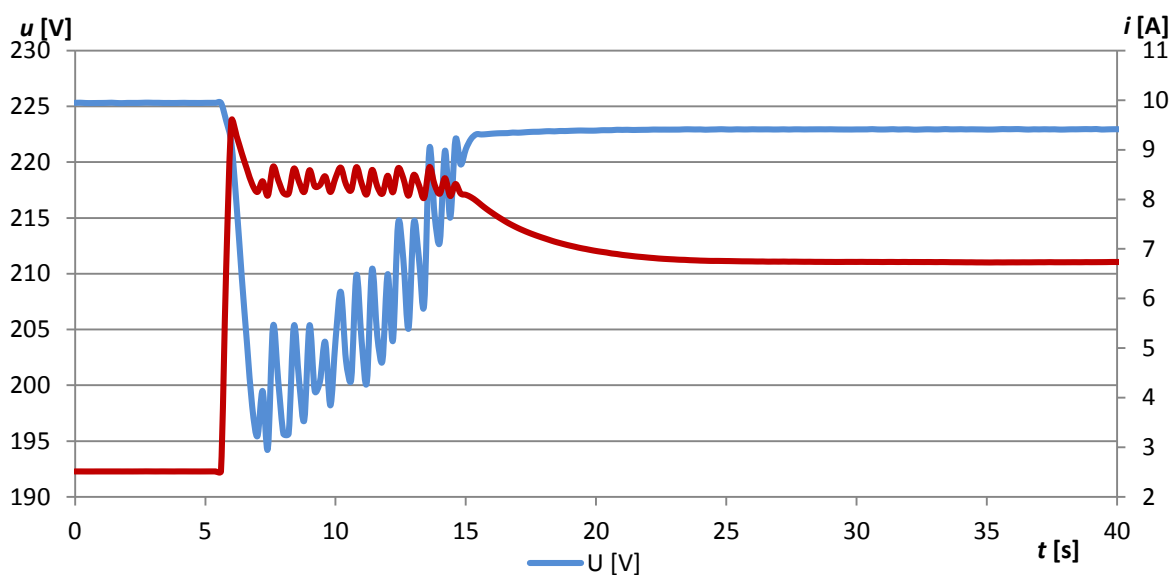
Další průběh transientního záznamu (obr. 54) obnoveného napájení byl zaznamenán na „malé“ kancelářské UPS jednotce APC ES700. Tato jednotka pracuje v režimu Off-line. Proud není zobrazen, jelikož byl tento záznam proveden na nezátížené jednotce. Prodlévání obnoveného napětí je větší a generované výstupní napětí má nesinusový průběh. Musí se však uvážit, že je tato jednotka jiné kategorie s dvacetinou ceny UPS jednotky Elteco. Přechodový jev trval zhruba 15 ms.



Obr. 54: Transientní záznam obnoveného napětí zdroje (UPS) APC ES700

3.8 Zatížení zdroje Elteco PS30T7 instalovanými spotřebiči elektrické stanice

Při testování zdroje UPS Elteco PS30T7 bylo provedeno také měření s instalovanými spotřebiči. V elektrické stanici (rozvodně) Vsetín 110/22 kV, jsou instalovány dva zdroje stejného typu. Jeden napájí nouzové osvětlení stanice a druhý šest požárních ventilátorů prostoru vnitřní rozvodny 22 kV. Tyto ventilátory se zapínají jednotlivými spínači, ale při jejich rychlém sledu zapnutí dojde díky záběrným proudům asynchronních motorů k přetížení UPS jednotky. Byla provedena zkouška téměř současného zapnutí těchto ventilátorů a průběh napětí proudu můžeme vidět na *obr. 55*. Od páté sekundy záznamu, kdy se připojily ventilátory, působilo proudové omezení zdroje a došlo ke snížení napětí až na 195 V. Trvalo zhruba deset vteřin, než proudový odběr klesl natolik, že se obnovilo napětí na 223 V. Tento stav je nebezpečný z hlediska bezpečnosti provozu, jelikož hrozí selhání UPS při přetížení v možném nouzovém provozu stanice. Je doporučeno tyto ventilátory zapojit přes zpožďovací relé, která zajistí postupné spínání bez nadměrných rozběhových proudů.



Obr. 55: Průběh současného zapnutí požárních (poruchových) ventilátorů na zdroji Elteco PS30T7

Závěr

Většina elektrických stanic 110/22 kV je dnes provozována v bezobslužném provozu, je proto důležité pro všechna instalovaná zařízení zajistit spolehlivé a bezvýpadkové napájení. V úvodní teoretické části této diplomové práce je proto proveden rozbor a přehled rozvodů vlastní spotřeby v těchto elektrických stanicích 110/22 kV, jenž by měl sloužit pro základní orientaci v důležitosti a charakteru všech instalovaných elektrických zdrojů a spotřeb. Následuje přehled a rozbor polovodičových zdrojů, které napájí rozvody zajištěného stejnosměrného a střídavého napětí vlastní spotřeby elektrických stanic. Uvádím také rozdělení a možnosti zapojení používaných UPS jednotek a také rotační zdroje, které mají v záskokových zdrojích své zastoupení.

Další částí této diplomové práce je už praktické měření vybraných dostupných zdrojů střídavého napětí při zatížení obecnou impedancí a nelineární zátěží. Byly vybrány dva polovodičové zdroje, které jsou použity v instalaci zajištěného střídavého rozvodu elektrické stanice. Prvním byl jednofázový střídač od firmy Benning řady Tebevert o výkonu 2500 VA, který je napájený ze staniční baterie. Druhý byl zvolen jednofázový zdroj (UPS) Elteco PS30T7 o výkonu 1700 W, taktéž napájený ze staničních baterií. Oba tyto zdroje jsou součástí elektrické stanice 22/110 kV Vsetín, která je v majetku ČEZ Distribuce, a. s. Třetím a čtvrtým zdrojem, hlavně z důvodu srovnání naměřených charakteristik, byla třífázová elektrocentrála Pramac ES500 a kancelářská UPS jednotka APC ES700.

Pro měření čistě činného a jalového výkonu na těchto zdrojích, bylo třeba vybrat a navrhnout zapojení vhodné nízkonapěťové střídavé zátěže, s velkým regulačním rozsahem a plynulým nastavením. Proto byl činný a jalový výkon měřen za použití autotransformátoru s připojeným reostatem, laboratorní tlumivkou s pěti odbočkami a kompenzačním kondenzátorem.

Nelineární zátěž byla nahrazena sestrojeným přípravkem s můstkovým usměrňovačem a připojitelnými vyhlazovacími kondenzátory, zastupující mimo jiné také polovodičové spínané zdroje malých spotřebičů, které se dnes v elektrických instalacích hojně vyskytují.

Měření všech veličin bylo provedeno za pomoci síťového analyzátoru BK-Elcom typ ENA500 a typ ENA330, který se díky svým širokým možnostem záznamu pro tato měření ukázaly jako vhodná volba. Všechna naměřená data pak byla částečně zpracována v dodávaném programu těchto analyzátorů BK-Report. Následně byla data exportována a charakteristiky sestrojeny v programu Excel 2013, který je součástí programového balíku Microsoft Office.

Z naměřených charakteristik zdrojů zatíženými činným a jalovým výkonem, je možno pozorovat jednotlivé vlastnosti každého zdroje. Je patrný rozdíl mezi polovodičovými zdroji a rotačním generátorem. Všechny měřené polovodičové zdroje jsou i při vysoké zátěži jak činným, tak jalovým výkonem díky své konstrukci s polovodičovými spínacími prvky s vlastní komutací odolné prakticky jakékoli změně frekvence a mají dobrou stálost výstupního napětí.

Z charakteristik harmonického zkreslení napětí a proudu testovaných zdrojů, sestrojených z hodnot naměřených veličin na přípravku reprezentující nelineární zátěž, je vidět vliv vyhlazovacích kondenzátorů připojených za můstkovým usměrňovačem na celkové harmonické zkreslení.

Z dynamického zatěžování zdrojů, kdy se na zdroje připojovaly jednotlivé druhy výše zmíněných zátěží, jsem sestrojil vybrané oscilogramy, ze kterých je možné pozorovat průběhy napětí a proudu v okamžiku přpnutí jednotlivých zátěží.

Z výsledků měření lze konstatovat, že testovaný střídač a UPS jednotka, instalované v elektrické stanici, jsou v kombinaci s obtokovým obvodem (by-pass) se vstupními filtry síťového napájení ideální volbou pro zajištěný rozvod střídavého napětí. Nevýhodou je ale cena staničních baterií s jejich nutnou údržbou a omezenou životností. Rotační zdroje malého výkonu mají zase dobrý poměr cena/elektrický výkon, ale díky většímu vlivu od nelineárních zátěží a většímu harmonickému zkreslení se nehodí pro napájení citlivých přístrojů. V praxi se pak musíme rozhodnout dle finančních možností a zálohovaného zařízení.

Při měření v elektrické stanici bylo také zjištěno, že výkon instalovaného zdroje (UPS) Elteco PS30T7, který napájí šest požárních ventilátorů, neodpovídá rozběhovým proudům při jejich současném zapnutí.

Výstupy této diplomové práce jsou tedy dva. Prvním výstupem je testování vlastností vybraných zdrojů při různém druhu zatížení a jejich výkonových možnostech. Dalším výstupem je pak praktické ověření vybraných druhů zátěží pro testování zdrojů nízkého napětí a jejich vlivu na zdroje. Tyto

plynule regulovatelné zátěže obecné impedance a nelineární zátěže byly vybrány s ohledem na jejich jednoduchou konstrukci s velkým regulačním rozsahem, běžnou dostupnost a nízkou cenu.

Seznam použité literatury

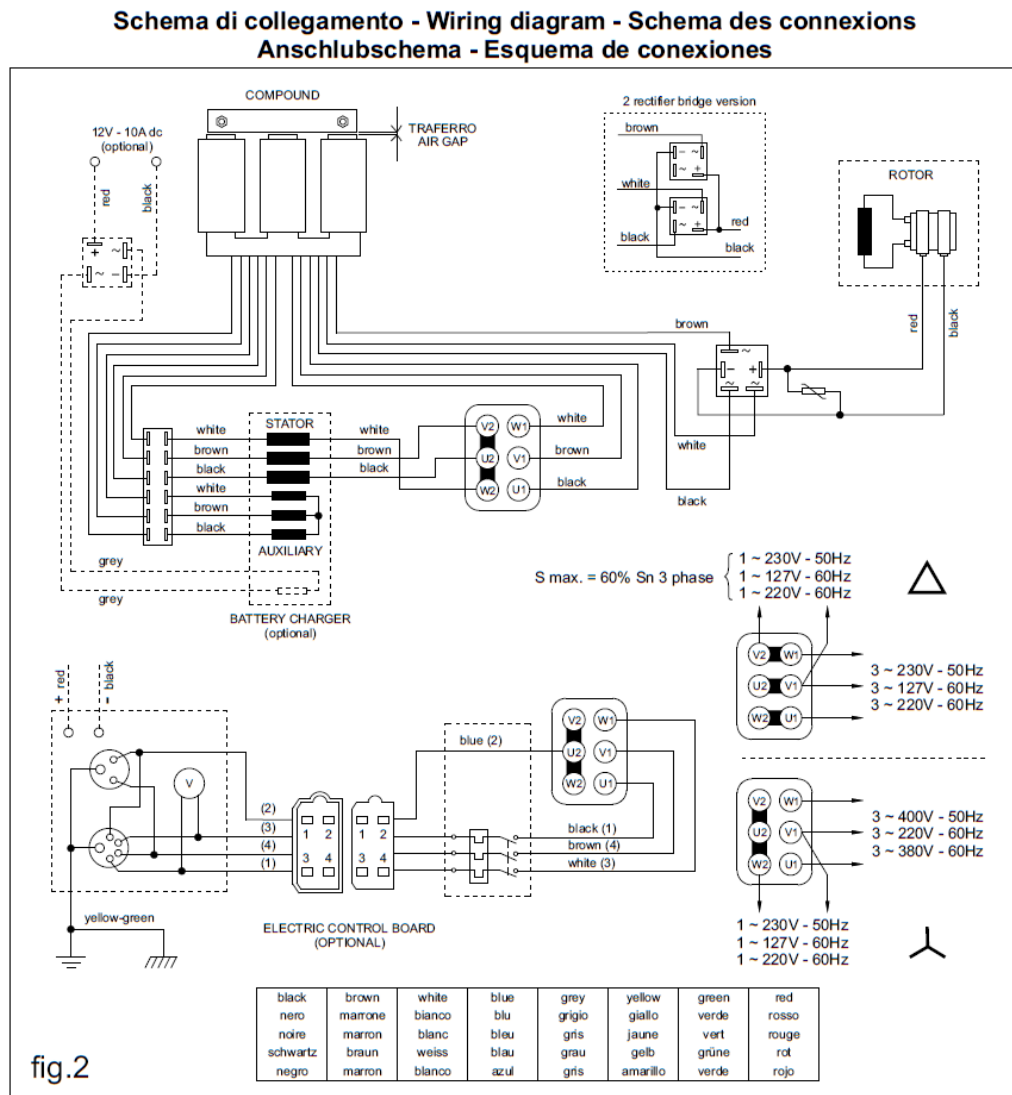
1. SANTARIUS, Pavel. *Elektrické stanice a vedení*. 1. vyd. Ostrava: VŠB – TU Ostrava 1990. 215 s. ISBN 80-7078-032-0.
2. KRYCHTÁLEK, Zbyněk; PAUZA, Josef. *Elektrické stanice*. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1989. 416 s. ISBN 80-03-00075-0.
3. CENEK, Miroslav; JINDRA, Jiří; JON, Miroslav; KAZELLE, Jiří; KOZUMPLÍK Josef; VRBA, Jan. *Akumulátory od principu k praxi*. 1. vyd. Praha: FCC Public 2003. 248 s. ISBN 80-86534-03-0.
4. KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita 2005. 180 s. ISBN 80-7043-422-8.
5. PAVELKA, Jiří; ČEŘOVSKÝ, Zdeněk. *Výkonová elektronika*. 2. vyd. Praha: ČVUT 2002. 201 s. ISBN 80-01-02094-0.
6. ŽÁČEK, Jaroslav. *Zdroje nepřerušovaného napájení – UPS*. Automa [online]. Dostupné z <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=33481>.
7. USV Klasifizierung IEC 62040-3, Dostupné z WWW: <http://www.usv-verkauf.ch/pi36/pi28/index.html>.
8. SKLENÁŘ, J.: UPS zdroje pro systémy střídavého zajištěného napájení, Trutnov: H. V. K. L. PROPAG TEAM, 1997.
9. CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2002. 135 s. ISBN 802480025X.
10. SIKORA, T., KRÁL, V.: *Obecné zátěže pro testování malých zdrojů nízkého střídavého napětí*. In inproceedings of 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, 2013
11. ŽÁČEK, Jaroslav. *Účinník v teorii a praxi*. Elektro [online]. Prosinec 2004. Dostupné z <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26065>.
12. XU, W.; DONG, M. *Tracking energy consumptions of home appliances using electrical signature data*. Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE, pp. 1–5, 2012.

Seznam příloh

Příloha 1: Schéma střídače Benning typ G110 E230/10,9/2 rfg-PWE řady Tebevert III	59
Příloha 2: Schéma synchronního generátoru elektrocentrály Pramac ES5000	60

Z.Nr.: 60 898.00E001A301		STR		Blattschaltbild/Block Diagram		Wechselrichter/Inverter		Blatt 1	
Z.Nr.: 60 898.00E001A301		STR		Blattschaltbild/Block Diagram		Wechselrichter/Inverter		Blatt 1	
Z.Nr.: 60 898.00E001A301		STR		Blattschaltbild/Block Diagram		Wechselrichter/Inverter		Blatt 1	

Priloha 2: Schéma synchronního generátoru elektrocentrály Pramac ES5000



		resistenze avvolgimenti (20°C) winding resistances								dati eccitazione (+ -) excitation data			
		S1				compound		rot	B.C.	vuoto no load		carico load (cos φ 0,8)	
		3ph [kVA]	1ph Λ [kVA]	stat [Ω]	aux [Ω]	(2,5mm²) [Ω]	(1mm²) [Ω]			[V]	[A]	[V]	[A]
50Hz 230/400V	T100 SB	6,0	2,7	1,93	1,91	0,23	0,91	12,7	0,16	17	1,0	100	5,3
	T100 SC	7,0	3,5	1,31	1,83	0,14	0,97	13,8	0,13	18	1,0	107	5,1
	T100 SCM	7,0	4,0	1,28	1,70	0,14	0,97	13,8	0,13	18	1,0	107	5,1
	T100 LA	8,5	4,5	0,88	1,50	0,09	1,03	15,8	0,11	23	1,1	115	4,8
	T100 LB	10,0	5,0	0,68	1,36	0,08	1,16	19,1	0,10	26	1,1	135	4,5
60Hz 127/220V	T100 SB	7,5	3,7	0,38	1,70	0,05	0,86	12,7	0,15	19	1,2	108	5,7
	T100 SC	9,0	4,5	0,28	1,60	0,04	0,92	13,8	0,12	23	1,3	122	5,8
	T100 LA	11,0	5,5	0,19	1,15	0,02	0,99	15,8	0,10	22	1,1	115	4,9
	T100 LB	13,0	6,5	0,14	1,10	0,02	0,99	19,1	0,09	28	1,2	140	4,7
60Hz 220/380V	T100 SB	7,5	3,7	1,13	1,70	0,13	0,86	12,7	0,15	19	1,2	108	5,7
	T100 SC	9,0	4,5	0,83	1,60	0,11	0,92	13,8	0,12	23	1,3	122	5,8
	T100 LA	11,0	5,5	0,57	1,15	0,07	0,99	15,8	0,10	22	1,1	115	4,9
	T100 LB	13,0	6,5	0,42	1,10	0,04	0,99	19,1	0,09	28	1,2	140	4,7